

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Titulo: Diseño de una unidad de hidrosulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería

Autor: José Carlos ROMERO TORRECILLA

Fecha: Febrero 2015





Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

RESUMEN DEL PROYECTO

Los procesos de cracking catalítico constituyen en la actualidad el corazón de la refinería moderna. Estos procesos son los principales productores de naftas de alto número de octano, las cuales tienen gran demanda como combustible, a partir de corrientes de petróleo pesadas y de bajo valor económico, como el gas oil pesado de vacío(VGO). En la actualidad estos procesos de cracking catalítico se llevan a cabo en unidades de tercera generación denominadas unidades FCC (craqueo catalítico en lecho fluidizado).

En sus comienzos este proceso fue diseñado con el objetivo de maximizar la producción de gasolina de alto octanaje, aunque en la actualidad, debido a los avances en el desarrollo de nuevos catalizadores, se puede operar en otras modalidades de producción, como son: máximo LPG y máximos destilados medios.

Los catalizadores empleados en los procesos de FCC son catalizadores ácidos, lo cual implica que son sensibles a envenamiento por azufre. Esto hace que la alimentación a los equipos de FCC deba ser sometida a un tratamiento previo de eliminación de azufre para evitar problemas con el catalizador y permitir que el proceso de craqueo catalítico sea eficiente.

Es por tanto necesario llevar a cabo un proceso de acondicionamiento de las corrientes de alimentación de FCC ya que si éstas contienen ciertos tipos de impurezas, como metales o azufre, pueden ocasionarse graves problemas en el funcionamiento de este tipos de unidades.

El Proyecto Fin de Carrera que aquí se presenta tiene como objetivo el diseño de una unidad de hidrodesulfuración, para acondicionar la alimentación de una unidad FCC de manera que ésta se encuentre libre de azufre, evitando así el envenamiento del catalizador.

Más concretamente se pretende el diseño de una unidad de hidrodesulfuración con capacidad para tratar una corriente de gasóleo ligero de vacío de 22.000 barriles por día, reduciendo el contenido en azufre de dicha corriente desde un 5% hasta un 0,1 % en peso.

De forma general las unidades de hidrodesulfuración constan de dos partes: un reactor catalítico de lecho fijo y una columna de destilación. Además, pueden incorporar una unidad de purificación de hidrógeno si se desea.

Así el conjunto de unidades para las que se ha realizado el diseño detallado en el presente proyecto son las siguientes:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Un horno de precalentamiento para el acondicionamiento de la corriente de alimentación a los reactores, debido a que las condiciones de operación requeridas en los reactores corresponden a alta temperatura y alta presión.

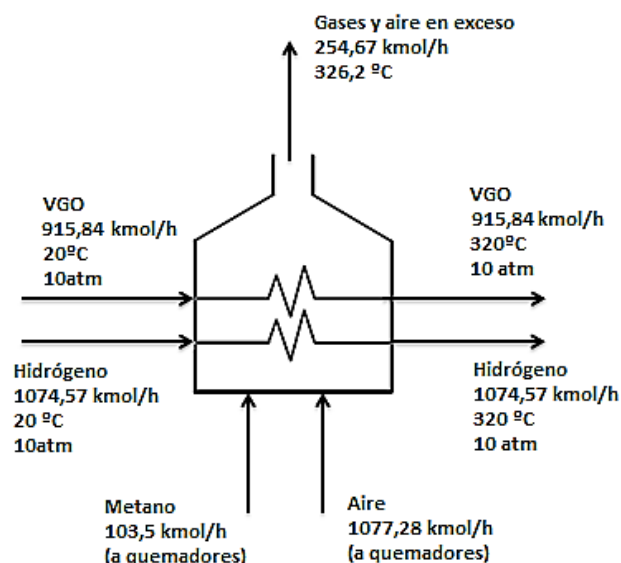


Figura 1.-Diagrama de flujo del horno de procesos

- Dos reactores catalíticos idénticos en los que tendrá lugar la reacción de hidrodesulfuración. Se diseñan con una configuración multitubular semejante a un intercambiador de carcasa y tubos para hacer más sencilla la refrigeración del sistema, ya que ésta se hace necesario dada el fuerte carácter exotérmico de la reacción de interés.

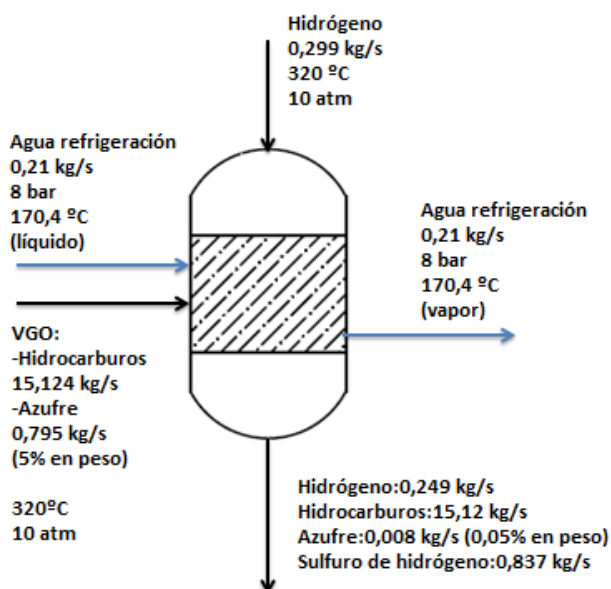


Figura 2.-Diagrama de flujo del reactor HDS

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Una columna de destilación de platos perforados de la que se obtienen una corriente de cabezas que contiene butano como componente mayoritario, el cual se dirige a la línea de gases licuados del petróleo de la misma refinería, y una corriente de colas que constituye la alimentación de la unidad FCC ya estabilizada.

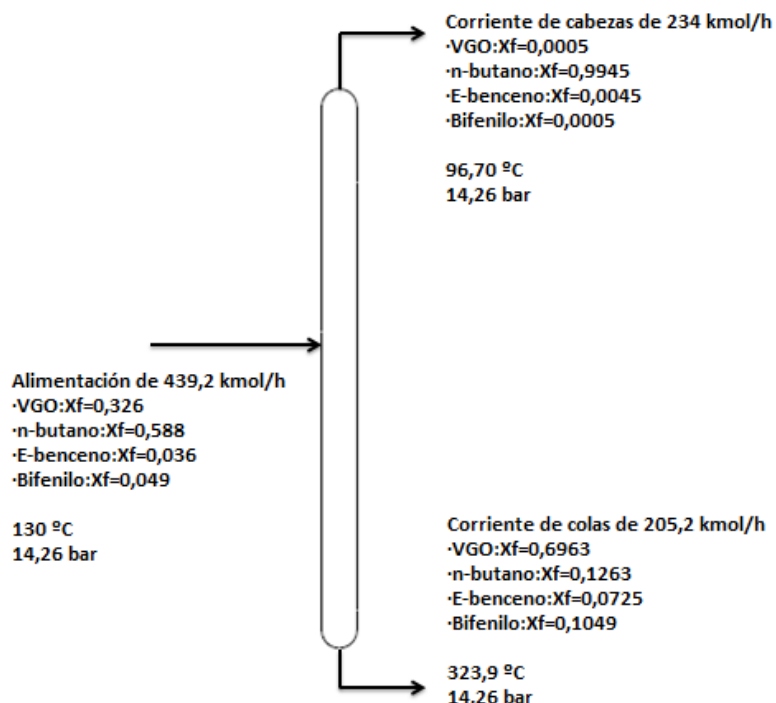


Figura 3.-Diagrama de flujo de la columna de rectificación

- Los intercambiadores de calor necesarios en el proceso, que son los siguientes: un intercambiador de acondicionamiento de la alimentación a la columna(ICA), un condensador total en la corriente de cabezas(AE) y un calderín o rehervidor en la corriente de colas(CV).

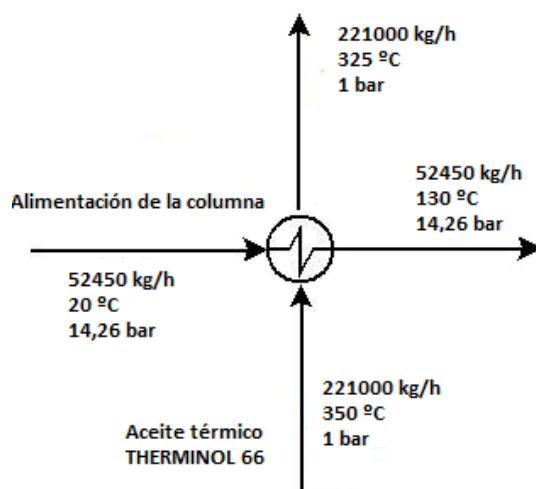


Figura 4.-Diagrama de flujo intercambiador ICA

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

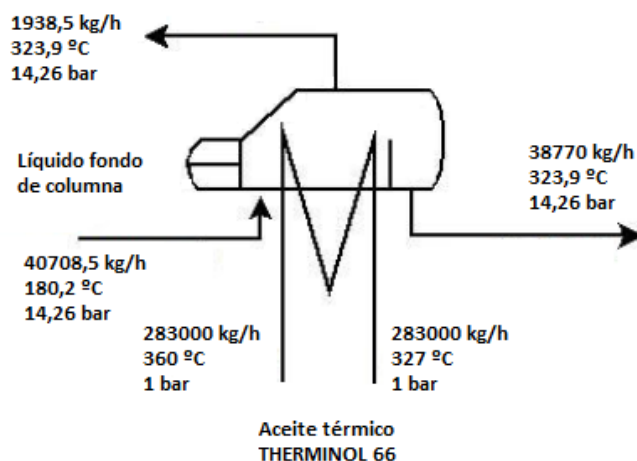


Figura 5.-Diagrama de flujo de intercambiador CV

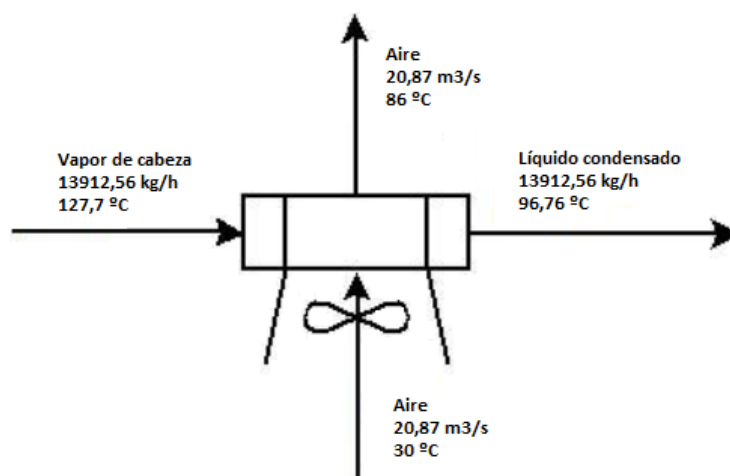


Figura 6.-Diagrama de flujo del intercambiador AE

- Los sistemas de conducciones y sistemas de impulsión de fluidos necesarios. Entre los sistemas impulsión de fluidos encontramos bombas para la impulsión de fluidos y compresores para la impulsión de gases, pues debemos tener en cuenta que el hidrógeno empleado como reactivo se encuentra en fase gaseosa.

Adicionalmente se ha abordado la unidad de purificación de hidrógeno pero, en este caso, se ha tratado como un modelo de caja negra, obviándose su diseño detallado ya que éste puede considerarse, por su envergadura, como un Proyecto Fin de Carrera independiente.

Además de esto, en este Proyecto no sólo se diseñan los equipos que conforman el proceso, sino que también se tienen en cuenta aspectos no menos importantes como:

El mantenimiento y la puesta en marcha del proceso, con el fin de optimizar el funcionamiento de la planta con objeto de evitar pérdidas económicas y la obtención de un producto con una calidad inferior a la deseada.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El estudio de seguridad y salud, donde se presentan las medidas de emergencia y seguridad básicas a cumplir en la instalación.

El estudio de impacto ambiental, para identificar, prevenir e interpretar los posibles impactos que puede producir la instalación de la unidad que se proyecta en el entorno que le rodea.

Por último, mencionar que se ha llevado a cabo una estimación económica de la implantación de la unidad de proceso diseñada en el presente Proyecto en una refinería, obteniéndose un coste que asciende aproximadamente a 10.252.905 €, comprobándose que es un precio razonable para el tipo de unidad que se trata, debiendo estudiarse su viabilidad en función de la planta en la que se integre.

Como dato a destacar respecto del presupuesto que en el presente proyecto se propone, indicar que este tipo de unidades de proceso son viables en refinería de modo general por costes de hasta 16.000.000 €.

Documento I:

MEMORIA.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN.....	8
1.1.-El cracking catalítico en el mundo del refino	8
1.2.-Generalidades del craqueo catalítico fluidizado	8
1.3.-Catalizadores en los procesos de FCC	9
1.4.- Unidades de hidrodesulfuración	9
1.4.1.-Reacción de hidrodesulfuración.....	10
1.4.2.-Condiciones de operación y etapas del proceso.....	10
1.4.3.-Hidrodesulfuración de fracciones muy pesadas	11
CAPÍTULO2.-OBJETO DEL PROYECTO	12
CAPÍTULO3.-VIABILIDAD DEL PROYECTO	14
3.1.-Viabilidad económica	14
3.2.-Viabilidad legal	15
3.2.1.-Legislación	15
3.2.2.-Normativa aplicada	16
CAPÍTULO 4.- UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	18
4.1.-Ubicación.....	18
4.2.-Distribución en planta	18
CAPÍTULO 5.- MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS.....	19
5.1.-Hidrógeno.....	19
5.1.1.-Proceso de obtención	19
5.1.2.- Aplicaciones.....	20
5.1.3.- El hidrógeno en la línea de producción.....	20
5.2.-Gasoil pesado de vacío (VGO)	20
5.2.1.-Características físico-químicas generales	20
5.2.2.-VGO en la línea de producción.....	21
5.3.-Azufre	21
5.3.1.-Proceso de obtención	21
5.3.2.-Aplicaciones	22
5.3.3.-El azufre en la línea de producción	22
5.4.-Sulfuro de hidrógeno	22
5.4.1.-Proceso de obtención	22
5.4.2.-Aplicaciones	22

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

5.4.3.-Sulfuro de hidrógeno en la línea de producción	23
5.5.-Butano	23
5.5.1.-Proceso de obtención	23
5.5.2.-Aplicaciones	23
5.5.3.-El butano en la línea de producción.....	23
5.6.-Gasoil de vacío estabilizado	24
5.6.1.-VGO estabilizado en la línea de producción	24
5.7.-Fluidos auxiliares.....	24
5.8.-Catalizador	25
CAPÍTULO 6.-DISEÑO DEL HORNO.....	26
6.1.-Introducción	26
6.2.-Normativa	26
6.3.-Descripción general de un horno de procesos.....	26
6.4.-Equipos disponibles y selección del más adecuado	27
6.4.1.-Tipos de hornos de proceso	27
6.4.2.-Selección del horno para la planta a diseñar	30
6.5.-Combustible utilizado y exceso de aire.....	31
6.5.1.-Poder calorífico del combustible	31
6.5.2.- Caudales requeridos de gas natural y de aire	32
6.6.-Elementos que conforman el horno	32
6.6.1.-Tubos.....	32
6.6.2.- Quemadores.....	34
6.6.3.-Chimenea y sistema de tiraje.....	34
6.6.4.-Recuperadores de calor	34
6.6.5.-Temperaturas del fluido y de los gases de combustión.....	35
6.7.-Diseño del horno	35
6.7.1.-Dimensiones del horno	35
6.7.2.-Diseño de la sección de radiación	36
6.7.3.-Diseño de la sección de convección.....	37
6.7.4.-Diseño de la chimenea	38
CAPÍTULO 7.- DISEÑO DE LOS REACTORES DE HIDRODESULFURACIÓN	39
7.1.-Introducción	39
7.2.-Criterio de diseño y selección	40
7.3.-Condiciones de operación.....	40

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.4.-Cinética de reacción	41
7.5.-Caracterización de la corriente de refrigeración	44
7.6.-Unidades de reacción.....	44
7.6.1.-Diseño de los elementos constitutivos de los reactores.....	45
7.6.2.-Aislamiento de los reactores.....	46
7.6.3.-Datos de diseño de los reactores	47
CAPÍTULO 8.-DISEÑO DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN	47
8.1.-Introducción	48
8.2.-Selección del tipo de columna	48
8.2.1.-Descripción general del funcionamiento de la torre	49
8.3.-Reglamentos y códigos de diseño aplicados	49
8.4.-Método de resolución de la columna de destilación	50
8.4.1.-Método FUG.....	50
8.4.2.-Condiciones de operación.....	51
8.4.3.-Balances de materia	52
8.4.4.-Número de platos y situación del plato de alimentación	53
8.5.-Diseño hidráulico	54
8.5.1.-Tipos de platos	54
8.5.2.-Otros aspectos generales.....	55
8.6.-Diseño mecánico	56
8.6.1.-Reglamentación y códigos de construcción.....	56
8.6.2.-Material de la columna	56
8.6.3.-Carcasa cilíndrica.....	57
8.6.4.-Fondos.....	57
8.6.5.-Faldilla	58
8.6.6.-Soporte del recipiente.....	58
8.6.7.-Aislamiento	59
8.6.8.-Accesorios externos	59
8.7.- Tabla de los datos mecánicos.....	59
CAPÍTULO 9.-DISEÑO DEL ACUMULADOR DE REFLUJO.....	61
9.1.-Introducción	61
9.2.-Reglamentos y códigos de construcción	61
9.3.-Características generales	62
9.3.1.-Material	62

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

9.3.2.-Cabezales.....	62
9.3.3.-Soporte.....	62
9.3.4.-Aislamiento	62
9.3.5.-Bocas de hombre	62
9.4.- Tabla de los datos mecánicos.....	63
CAPÍTULO 10.- DISEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	64
10.1.- Introducción	64
10.2.- Intercambiadores de calor en la industria	64
10.2.1.-Intercambiadores de calor de doble tubo	65
10.2.2.-Intercambiadores de calor tipo placa	66
10.2.3.-Intercambiadores enfriados por aire	67
10.2.4.-Intercambiadores de calor de carcasa y tubos	67
10.3.-Elección del tipo de intercambiador para cada servicio	68
10.4.-Intercambiadores de calor de carcasa y tubos diseñados	69
10.4.1.-Reglamentos y códigos de diseño.....	69
10.4.2.-Descripción y funcionamiento	70
10.4.3.-Características generales de los intercambiadores.....	72
10.4.4.-Especificaciones de los intercambiadores	75
10.5.-Aerorefrigeradores.....	78
10.5.1.-Reglamentos y códigos de diseño.....	78
10.5.2.-Descripción y funcionamiento	78
10.5.3.-Características generales de los aerorefrigeradores	79
10.5.4.-Especificaciones del aerorefrigerador	81
CAPÍTULO 11.- SISTEMA DE CONDUCCIONES Y ACCESORIOS	83
11.1.-Introducción	83
11.2.-Características generales del sistema de conducciones	83
11.2.1.-Materiales	83
11.2.2.-Diámetro	83
11.2.3.-Espesor	84
11.2.4.-Aislamiento	84
11.2.5.-Elementos y accesorios	84
11.2.6.-Disposición de las tuberías y uniones	87
CAPÍTULO 12.-SISTEMAS DE IMPULSIÓN	89
12.1.-Introducción	89

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

12.2.-Reglamentos y códigos de construcción	89
12.3.-Parámetros de selección de bombas	89
12.3.1.-Bombas centrífugas.....	90
12.4.-Sistemas de impulsión de gases.....	91
12.4.1.-Ventiladores	91
12.4.2.- Soplantes.....	92
12.4.3.-Compresores	92
CAPÍTULO 13.-MANTENIMIENTO	94
13.1.- Introducción	94
13.2.- Mantenimiento	94
13.2.1.- Funciones de mantenimiento	94
13.3. Tipos de mantenimiento	95
13.3.1. Mantenimiento correctivo	95
13.3.2.- Mantenimiento preventivo.....	96
13.3.3.- Mantenimiento predictivo	96
13.3.4.- Mantenimiento productivo total (MPT).....	97
13.4.- Política de mantenimiento.....	97
13.5.- Mantenimiento de los equipos de la planta	98
13.5.1. Reactores.....	98
13.5.2.- Intercambiadores de calor	99
13.5.3.- Horno de procesos	99
13.5.4.- Columna de destilación (CD).....	100
13.5.5.- Bombas.....	100
13.5.6.- Válvulas	101
13.5.7.- Extintores	101
13.6.- Puesta en marcha.....	101
CAPÍTULO 14.-SEGURIDAD E HIGIENE	103
14.1.-Legislación aplicable.....	103
14.1.1.- Legislación para la seguridad laboral.	103
14.1.2.- Legislación para la higiene laboral.	104
14.2.-Riesgo Químico.	104
14.3.-Riesgo físico.....	105
14.3.1.- El ruido.	105
14.3.2.- Ambiente térmico.	106

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

14.4.- Riesgo de explosión e incendio.	107
14.5.- Riesgo eléctrico.	108
14.6.- Riesgo de almacenamiento.	109
14.7.- Protecciones personales.	110
14.7.1.- Equipos de protección individual (EPI).....	110
14.7.2.- Equipos de protección colectiva.	111
14.8.- Señalización de seguridad.	111
14.8.1. Paneles visuales.....	111
14.8.2.- Alumbrado.....	113
14.8.3. Señalización acústica.	114
14.9.-Gestión de seguridad.	114
CAPITULO 15. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL.....	116
15.1. Introducción.	116
15.2. Legislación.	116
15.3. Gestión de residuos generados.....	116
15.4.-Emisiones atmosféricas.....	117
CAPÍTULO 16.-BIBLIOGRAFÍA.....	119
16.1.-Libros.....	119
16.2.-Artículos	120
16.3.-Webs	121
16.4.-Programas Informáticos.....	121

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN

1.1.-El cracking catalítico en el mundo del refino

Los procesos de cracking catalítico constituyen en la actualidad el corazón de la refinería moderna. Estos procesos son los principales productores de naftas de alto número de octano, las cuales tienen gran demanda como combustible, a partir de corrientes de petróleo pesadas y de bajo valor económico, como el gas oil pesado de vacío(VGO).

Además de gasolina, el proceso genera Diesel y olefinas ligeras que pueden ser convertidas en naftas de alto octanaje mediante alquilación o bien emplearse como materias primas en el sector petroquímico.

En el cracking catalítico debe su nombre a que las reacciones se llevan a cabo sobre la superficie de un catalizador de tipo adsorbente que libera los productos craqueados ligeros y retiene los productos asfálticos, transformándolos en coque. El coque se elimina del catalizador más tarde en la etapa de regeneración, tras la cual el catalizador es devuelto al proceso para su nueva utilización.

Las primeras versiones de cracking catalítico empleaban dispositivos mecánicos para hacer circular el catalizador entre el reactor y el regenerador.

La segunda generación de estos crackers catalíticos incluían sistemas de impulsión con aire para hacer circular el catalizador de manera más rápida, logrando a su vez mayores conversiones de gas oil pesado en naftas y productos ligeros.

En la actualidad se emplean sistemas de tercera generación denominados FCC (craqueo catalítico fluidizado), los cuales han sustituido casi por completo a sus versiones anteriores en el mundo del refino del petróleo.

1.2.-Generalidades del craqueo catalítico fluidizado

Como podemos deducir de lo expuesto en el apartado anterior, el objetivo del FCC no es otro que transformar corrientes pesadas de petróleo en productos más ligeros, produciendo un amplio rango de productos, como son: fuel gas, LPG (gases licuados del petróleo), nafta, gasóleo (light cycle oil) y fuelóleo (decanted oil).

En sus comienzos este proceso fue diseñado con el objetivo de maximizar la producción de gasolina de alto octanaje, aunque en la actualidad, debido a los avances en el desarrollo de nuevos catalizadores, se puede operar en otras modalidades de producción, como son: máximo LPG y máximos destilados medios.

La característica fundamental que diferencia el proceso de FCC de otros procesos catalíticos de refinería es que el catalizador no se sitúa en un lecho fijo, sino que se encuentra fluidizado, es decir, suspendido en un gas de proceso y en continua circulación en la unidad.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El proceso consiste en varias etapas: precalentamiento de la alimentación, vaporización de la alimentación, reacción de desintegración, la separación de los productos del catalizador y regeneración del catalizador.

En este proceso, la alimentación, comúnmente conocida como gasóleo, proviene de la destilación atmosférica o de vacío, la cual se inyecta en el fondo del riser y se vaporiza al ponerse en contacto con el catalizador regenerado, posteriormente se llevan a cabo las reacciones de desintegración catalítica en flujo ascendente. El calor de reacción total de este sistema reaccionante es de tipo endotérmico.

Después de la reacción, la corriente que sale del riser se transfiere a uno o más ciclones para separar los productos del catalizador. Estos productos son enviados a una torre de destilación mientras que el catalizador, que aún contiene hidrocarburos atrapados sobre la superficie catalítica, es tratado con vapor en la unidad denominada agotador.

El catalizador coquificado se envía al regenerador donde se introduce aire para quemar el coque, esta combustión genera calor que es transferido en su mayor parte al catalizador regenerado. De este modo ese calor vaporiza la alimentación líquida del reactor y provee el calor de reacción total para las reacciones de craqueo.

1.3.-Catalizadores en los procesos de FCC

Los catalizadores empleados en los procesos de FCC son catalizadores ácidos, lo cual implica que son sensibles a envenamamiento por azufre. Esto hace que la alimentación a los equipos de FCC deba ser sometida a un tratamiento previo de eliminación de azufre para evitar problemas con el catalizador y permitir que el proceso de craqueo catalítico sea eficiente.

Las unidades empleadas en refinería para tal fin son las denominadas unidades de hidrodesulfuración

1.4.- Unidades de hidrodesulfuración

Se caracterizan por ser unidades muy versátiles en las que se pueden tratar naftas ligeras, naftas químicas, naftas “full range”, querosenos o bases de lubes, es decir, todo lo que se quiera desulfurar. Son por ello unidades de uso múltiple y por lo general funcionan por campañas, conforme a una programación previa que se ajuste a los calendarios de la refinería.

Las unidades de hidrodesulfuración nacieron con el propósito de eliminar los compuestos sulfurados de las fracciones que se debían someter a craqueo catalítico fluidizado(FCC), pues sus catalizadores ácidos son muy sensibles al azufre y sufren envenamamiento en presencia del mismo. Sin embargo dada la, cada vez, mayor presión sobre el azufre hoy en día se emplean este tipo de unidades para eliminar el azufre de casi todos los productos finales de la industria del refino.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.4.1.-Reacción de hidrodesulfuración

La reacción de desulfuración se produce por hidrogenación catalítica, transformando así todo el S presente en H_2S , según las reacciones:

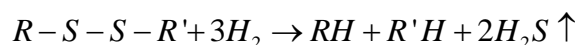
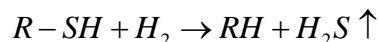


Figura 1.-Reacciones principales

Los catalizadores más activos y más utilizados para la hidrodesulfuración son los óxidos o sulfuros metálicos de Co-Mo (Co como promotor y Mo como base) soportados sobre alúmina.

1.4.2.-Condiciones de operación y etapas del proceso

De forma general las unidades de hidrodesulfuración constan de dos partes: un reactor catalítico de lecho fijo y una columna de destilación. Además, puede incorporar una unidad de purificación de hidrógeno si se desea. El esquema general de una unidad de este tipo bien podría ser el que se representa en la siguiente figura.

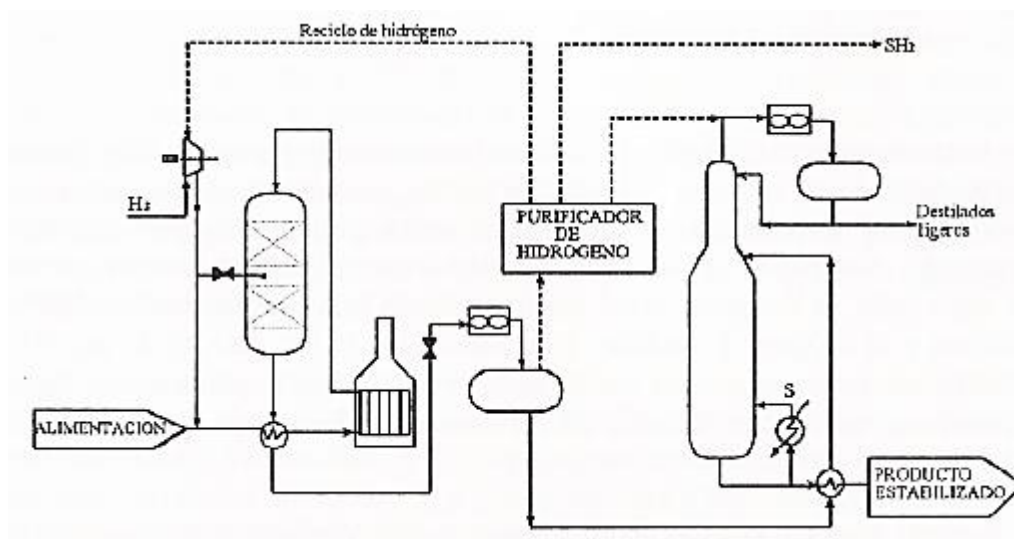


Figura 2.-Esquema genérico de una unidad HDS

1º.-Tanto la corriente de alimentación como la corriente de hidrógeno deben ser convenientemente presurizadas y calentadas antes de su entrada al sistema de reacción.

2º.-Las condiciones de trabajo varían entre los 270-420°C y los 15-70 bar de presión, dependiendo del peso molecular medio de la alimentación (cuanto mayor sea este más drásticas deben ser las condiciones). Una vez presurizada y calentada, la alimentación se lleva al reactor, donde se pone en contacto con el catalizador en flujo descendente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3º.- Una vez se ha producido la reacción, la corriente se enfría y se lleva a un separador de gases.

4º.- Los gases de salida del separador se llevan a la unidad de purificación, donde se separa el H_2S del H_2 , el cual se recicla. La separación en esta etapa debe ser muy cuidadosa ya que el H_2S reduce la actividad de los catalizadores y debe ser, por lo tanto, separado completamente del reciclo de H_2 . Para esta misión se suele emplear una unidad de aminas de absorción similar a las empleadas en refinería en la línea de proceso de Gases Licuados del Petróleo (GLP).

5º.- Como durante la desulfuración se produce craqueo, los nuevos componentes más ligeros deben separarse en una columna de destilación, de modo que los nuevos ligeros salen por cabezas para ser enviados a la unidad de ligeros mientras que la corriente de colas constituye el producto estabilizado y totalmente desulfurado.

1.4.3.-Hidrodesulfuración de fracciones muy pesadas

El tratamiento de fracciones muy pesadas puede obligar a trabajar a muy altas temperaturas y presiones. En estos casos, hay que aumentar mucho la presión parcial del H_2 para evitar así el craqueo excesivo. Como consecuencia de esto el hidrógeno presente en el sistema de reacción puede no llegar a solubilizarse por completo, convirtiéndose en un reactor trifásico (trickle bed), donde se tiene un catalizador sólido, hidrocarburos líquidos e hidrógeno gaseoso.

Es en este caso en particular donde se enmarca el Proyecto que se desarrolla en esta Memoria.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 2.-OBJETO DEL PROYECTO

El presente Proyecto Fin de Carrera tiene como objeto principal el diseño de una unidad de hidrodesulfuración con capacidad para tratar una corriente de gas oil pesado de vacío (VGO) de 143.000 L/h, con un contenido en azufre de un 5% en peso, reduciendo el contenido en azufre a un 0,1% o menos.

Este proyecto se enmarca en la industria del refino y es una línea de proceso que conecta la zona de colas de la columna de destilación de crudo con las unidades de craqueo catalítico fluidizado. La unidad a diseñar constituye una etapa esencial de acondicionamiento de la corriente de alimentación a las unidades de craqueo catalítico, sin la cual se produciría el envenenamiento de los catalizadores.

En el presente documento aparece como unidad principal el sistema de reacción, acompañado de un conjunto de equipos auxiliares, así como del tren de separación correspondiente.

Los elementos a diseñar en este Proyecto son por tanto: 2 Reactores químicos de hidrodesulfuración (trickle bed), un horno de acondicionamiento de los reactivos, una columna de destilación, tres intercambiadores de calor, los sistemas de impulsión necesarios (bombas y compresores), el rack de tuberías y accesorios. Se omite el diseño de la unidad de aminas la cual trataremos con el modelo de caja negra. Esto es así porque su diseño bien podría considerarse un Proyecto Fin de Carrera adicional.

En la página siguiente se presenta un diagrama de la unidad de proceso a diseñar para que se sea más intuitivo comprender a que nos referimos en el párrafo anterior.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

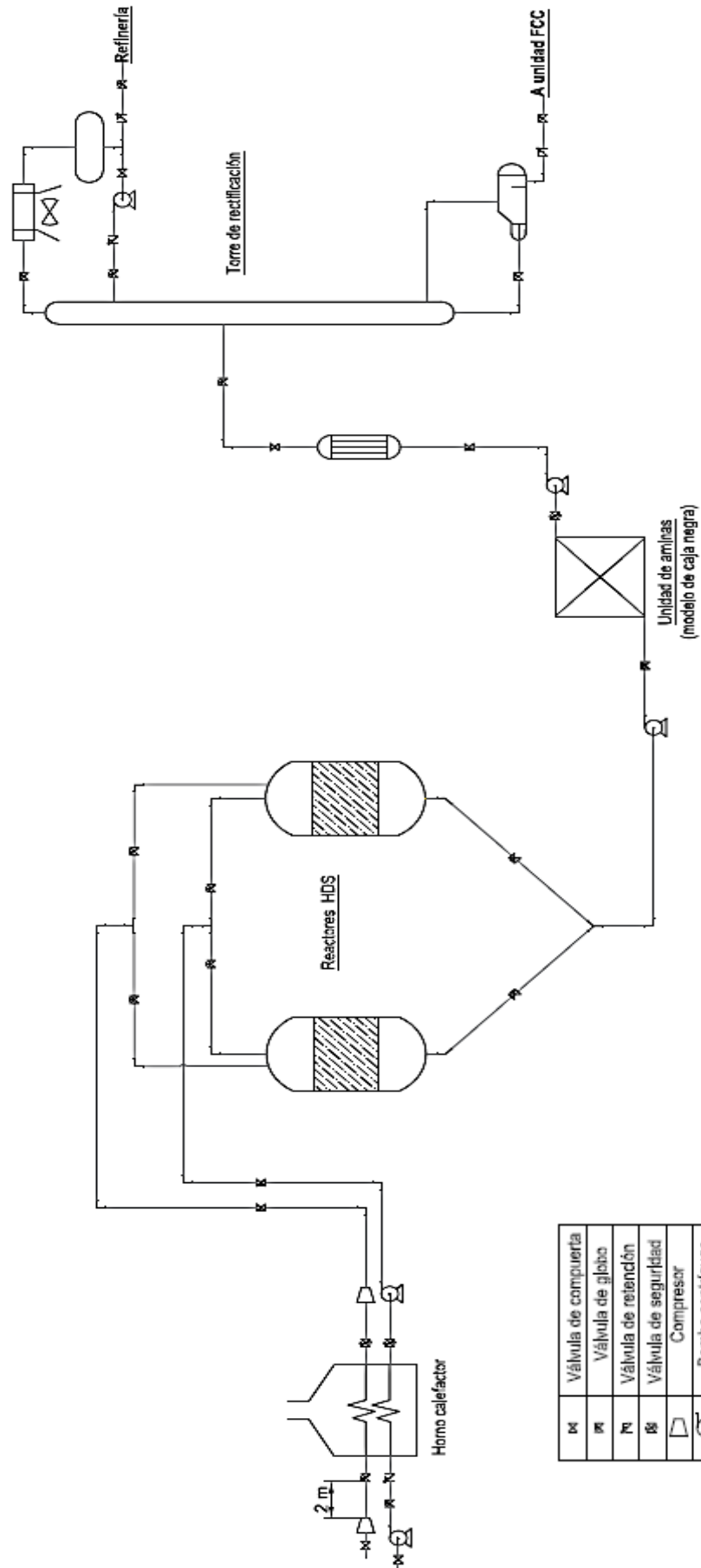








Figura 3.-Esquema general de la línea de proceso diseñada

D4	Válvula de compuerta
D5	Válvula de globo
D6	Válvula de retención
D8	Válvula de seguridad
	Compresor
	Bomba centrífuga
	Intercambiador ICA
	Aerotrefrigerador
	Acumulador de relleno
	Calderín CV
L	Codo 90°
J	Bifurcación en T

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 3.-VIABILIDAD DEL PROYECTO

En el presente capítulo se trata la viabilidad del Proyecto Fin de Carrera desde dos puntos de vista, como son el económico y el legal.

3.1.-Viabilidad económica

Dado que nuestro diseño no se va a localizar en ninguna refinería en concreto, sino que es un diseño de una unidad de proceso que bien podría instalarse en diversas industrias de refino no vamos a realizar un estudio económico completo, pues carece de sentido hasta que no se conozca la industria que desee la construcción de dicha línea de proceso, sus ingresos, gastos, etc.

De este modo nos centraremos en el coste total de nuestro diseño, llegando nuestras miras hasta el Presupuesto de Ejecución por Contrata(PEC).

Para llegar hasta ese valor hay que realizar un proceso de cálculo minucioso para asegurar una correcta estimación de los presupuestos, pues el coste del mismo respecto de los potenciales beneficios que pueda aportar es lo que hará del mismo un diseño atractivo para la industria. Dichos cálculos se encuentran extensamente desarrollados en el Documento 4: Presupuesto.

En este apartado se muestran dos tablas resumen donde se recogen el P.E.M y el P.E.C:

Partidas	Coste[€]
EQUIPOS DE PROCESO	7129245,67
EQUIPOS AUXILIARES	5067
BOMBAS Y COMPRESORES	181113,18
TUBERÍAS	3952,215
VÁLVULAS Y ACCESORIOS	4125,52
Presupuesto de ejecución material(PEM)	7323503,59

Tabla 1.-Presupuesto de ejecución material

Concepto	Coste[€]
PEM	7323503,59
GASTOS GENERALES(13%)	952055,466
BENEFICIO INDUSTRIAL(6%)	439410,215
IVA(21%)	1537935,75
Presupuesto de ejecución por contrata(PEC)	10252905

Tabla 2.-Presupuesto de ejecución por contrata

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Comparando el coste de nuestro diseño con el coste medio de este tipo de líneas de proceso en refinería, el cual se establece entre los 9 y los 12,5 millones de euros, según datos recogidos en bibliografía, podemos considerar que nuestro diseño tiene un coste adecuado a sus prestaciones.

La viabilidad económica de líneas de proceso como la que se diseña en este Proyecto está más que demostrada si prestamos atención al dato de que en la actualidad se emplean este tipo de unidades para eliminar el azufre de casi todos los productos finales de la industria del refino. Con esto se entiende que todas las refinerías cuentan con líneas de hidrodesulfuración debido a que son unidades muy versátiles: resuelven problemas de contenido en azufre de productos finales, brindan la posibilidad de dar uso a fracciones del petróleo de poco valor añadido para transformarlas en productos de alto valor añadido, permiten la integración energética, permiten producción de grandes cantidades de azufre, aumentan la variedad de productos generados en la planta, etc.

3.2.-Viabilidad legal

La viabilidad legal viene determinada por la legislación y normativa que el proyecto debe cumplir, tanto a nivel de los productos, como a nivel del proceso.

El presente Proyecto cumple todas las normativas vigentes vinculadas con los aspectos tratados en el mismo, no existiendo ninguna legislación que afecte al Proyecto de manera que impida su ejecución ni operación cuando la planta esté en marcha.

3.2.1.-Legislación

- **Ley 31/1995**, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- **Real Decreto 1299/2006**, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro. BOE núm. 302 de 19 de diciembre.
- **Real Decreto 1244/1979**, de 4 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión.
- **Real Decreto 1942/1993**, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección contra Incendios.
- **Real Decreto 2267/2004**, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales.
- **Real Decreto 400/1996**, de 1 de marzo. Aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- **Real Decreto 485/1997**, de 14 de abril. Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en los lugares de trabajo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— **Real Decreto 773/1997**, de 30 de mayo. Disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.

— **Real Decreto 1254/1999**, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes.

— **Real Decreto 379/2001**, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de productos Químicos y sus instrucciones técnicas complementarias.

— **Real Decreto 614/2001**, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.

— **Real Decreto de 842/2002**, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.

— **Decreto 3151/68**, de 28 de noviembre., reglamento de la Línea de Alta tensión.

— **Real Decreto 681/2003**, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

— **Reglamento (CE) 1907/2006** del Parlamento Europeo y el Consejo, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

— **Real Decreto 286/2006**, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

— **Real Decreto 374/2001**, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.

— **Real Decreto 1124/2000**, de 16 de Junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de Mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E. núm. 145 de 17 de Junio de 2000).

3.2.2.-Normativa aplicada

— Código ASME sección VIII, División I. Boiler and Pressure Vessel Code(2004)

— Código ASME B31.3. Process Piping (2003).

— Normas API 610. Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries (2003).

— Normas API 650. Welded Steel Tanks for Oil Storage(1998)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Normas API 660. Shell and Tube Heat Exchangers for General Refinery Service (1992).
- Normas TEMA, Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association.
- Normas ANSI, American National Standards Institute.
- Normas ISO, International Organization for Standardization.
- Reglamento de instalaciones petrolíferas.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 4.- UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

4.1.-Ubicación

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores la unidad de proceso diseñada en el presente Proyecto Fin de Carrera es una unidad intermedia de gran uso en la industria del refino, por lo que nuestro diseño no se ha ubicado en ninguna planta en concreto.

El diseño que aquí se desarrolla bien puede ser útil para diversas plantas con diferente ubicación geográfica.

4.2.-Distribución en planta

Para la distribución en planta se han seguido las indicaciones de la bibliografía “Recomendaciones para el diseño del “plot-plan”, Alejandro Anaya Durand, Instituto Mexicano del Petróleo, Mayo 1998.”

La distribución seleccionada y las normas que se han seguido se explican con mayor detalle en el **apartado 6.3 del Anexo 6**, debido a que esta distribución sirve de apoyo para estimar los metros necesarios de tubería en el diseño del rack de tuberías.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 5.- MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS

5.1.-Hidrógeno

El hidrógeno se encuentra mayoritariamente en la naturaleza en forma molecular formando parte de gases, de la molécula de agua y de multitud de compuestos orgánicos. Este hecho se debe fundamentalmente, a su elevada reactividad prácticamente en cualquier entorno.

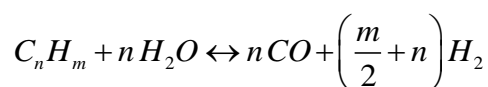
5.1.1.-Proceso de obtención

Todos los procesos de obtención se basan en la generación previa de “gas de síntesis”, una mezcla de CO y H₂, seguida de la eliminación del CO formado, que a su vez proporciona más hidrógeno en la denominada “reacción de desplazamiento”.

El “gas de síntesis” puede obtenerse por medio de dos procedimientos principales, que se comentan a continuación:

✓ Reformado con vapor de agua:

La materia prima, a elevada temperatura y presión moderada, se mezcla con vapor de agua y se hace pasar a través de un lecho de catalizador:



El hidrocarburo ha de estar en forma gaseosa y exento de impurezas que pudiesen desactivar los catalizadores, como las impurezas de azufre.

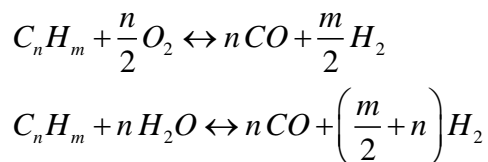
Estas restricciones sobre calidad y estado físico limitan el número de corrientes que pueden ser utilizadas como alimentación: gas natural, GLP y naftas, y en raras ocasiones queroseno ligero, todas ellas de relativo alto precio, son las opciones disponibles.

A causa de la elevada absorción de calor en la reacción endotérmica, la preparación industrial se realiza en hornos tubulares; el catalizador, habitualmente a base de Ni, está contenido en el interior de los tubos calentados exteriormente.

✓ Oxidación parcial:

La reacción principal consiste en la combustión incompleta, en presencia de vapor de agua, de cualquier sustancia que contenga carbono orgánico. El vapor de agua también reacciona con la alimentación (reacción de reformado) y actúa de moderador de la combustión parcial, de forma que, controlando su dosificación, se estabiliza la temperatura en el reactor. A continuación se indican las reacciones implicadas:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.



5.1.2.- Aplicaciones

El hidrógeno puede emplearse dentro de dos vertientes bien diferenciadas:

- ✓ En los procesos de obtención de productos industriales tales como la síntesis de amoníaco y fundamentalmente en las instalaciones de una refinería. En esta última, además, hay que distinguir entre el consumo de hidrógeno en reacciones propiamente dichas y el de aportación a las unidades como materia prima de proceso.
- ✓ El papel del hidrógeno como fuente de energía alternativa y renovable, tanto por medio de una conversión directa de su energía química en electricidad a través de la pila combustible, como la combustión directa en motores alternativos o turbinas de gas.

5.1.3.- El hidrógeno en la línea de producción

El hidrógeno utilizado como alimentación para la planta objeto de estudio, proviene de la misma Refinería. Presenta las siguientes características en la línea de producción:

Hidrógeno	
Presión(atm)	10
Temperatura (°C)	320
Caudal másico(kg/s)	0,299
Caudal molar(mol/s)	149,25

Tabla 3.-Propiedades del hidrógeno en la línea de producción

5.2.-Gasol pesado de vacío (VGO)

Es una de las corrientes principales obtenidas en la destilación a vacío en refinería. No es considerado un producto final sino que se emplea bien para mezcla (cutter stocks) con fuel-oil o bien se lleva a unidades de FCC donde en las condiciones de operación adecuadas sus largas moléculas se rompen y dan lugar a componentes más ligeros como GLP, naftas o gasóleos.

5.2.1.-Características físico-químicas generales

Es un líquido aceitoso con una densidad promedio de 0,858 g/mL, que destila entre los 180-230°C y se compone mayoritariamente de hidrocarburos de 13 a 17 átomos de carbono.

Tanto su forma de obtención como sus aplicaciones se han expuesto en el apartado anterior por lo que pasamos a describir sus propiedades en la línea de producción.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

5.2.2.-VGO en la línea de producción

El VGO utilizado como alimentación para la planta a estudio, proviene de la misma Refinería. Presenta las siguientes características en la línea de producción:

Gasóleo ligero de vacío	
Presión(atm)	10
Temperatura (°C)	320
Caudal másico(kg/s)	15,92
Caudal molar(mol/s)	127
Densidad(kg/m ³)	795,98

Tabla 4.-Propiedades del VGO en la línea de producción (caudal referido a un reactor)

5.3.-Azufre

El azufre es un elemento muy abundante en la corteza terrestre, se encuentra generalmente combinado en forma de sulfuros (pirita, galena) y de sulfatos (yeso). En su forma nativa se haya en las zonas colindantes de aguas termales, zonas volcánicas y minas de cinabrio, galena, esfalerita y estibina.

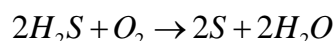
Es un no metal que presenta un color amarillento cuando se encuentra en estado sólido y que posee un olor característico. Es insoluble en agua y es un elemento multivalente, siendo comunes los estados de oxidación -2,+2,+4,+6.

Presenta formas alotrópicas en los estados de agregación sólido, líquido y gaseoso. Sus estructuras cristalinas más comunes son el octaedro ortorrómbico (azufre α) y el prisma monoclinico (azufre β), siendo la temperatura de transición entre ellos de 96°C. En ambas estructuras el azufre se encuentra formando moléculas de S₈ con forma de anillo y es la diferente disposición de estas moléculas la que provoca las diferentes estructuras cristalinas.

5.3.1.-Proceso de obtención

En Lousiana (EEUU), primer productor mundial, se extrae mediante el proceso Frasch consistente en inyectar vapor de agua sobrecalentado para fundir el azufre que posteriormente es bombeado al exterior empleando aire a presión.

También puede obtenerse por separación del gas natural, el cual contiene sulfuro de hidrógeno que una vez separado se somete a combustión para obtener azufre, mediante la reacción:



El azufre presente en los combustibles fósiles provoca que tras la combustión se obtenga dióxido de azufre que combinado con agua produce la lluvia ácida. Para evitar este fenómeno las legislaciones de los países han tomado medidas muy restrictivas en la reducción del contenido en azufre en los combustibles. Este azufre constituye en la actualidad un porcentaje importante de la producción mundial.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

5.3.2.-Aplicaciones

Es empleado en una gran diversidad de procesos industriales, como son la producción de ácido sulfúrico para baterías, la fabricación de pólvora y el vulcanizado del caucho. Además, los sulfitos se usan para blanquear el papel, así como en la fabricación de fósforos.

El tiosulfato de sodio o amonio se emplea en la industria fotográfica como fijador, pues tiene la capacidad de disolver el bromuro de plata; y el sulfato de magnesio (sal de Epsom) tiene usos diversos como laxante, exfoliante, o suplemento nutritivo para plantas.

El azufre tiene también usos como fungicida y en la manufactura de fosatosfertilizantes.

5.3.3.-El azufre en la línea de producción

El azufre presente en nuestro Proyecto es el que se encuentra presente en el VGO, siendo nuestro principal objetivo su eliminación del mismo para acondicionarlo antes de la entrada del gasoil a la unidad de FCC, como ya se ha explicado en apartados anteriores.

5.4.-Sulfuro de hidrógeno

Es un gas más denso que el aire, inflamable, incoloro, tóxico y odorífero. Se encuentra en pequeñas cantidades en el organismo humano, donde desempeña funciones esenciales.

Cuando se encuentra en disolución acuosa es un ácido hidrácido, denominado ácido sulfhídrico, el cual genera sales si se combina con bases fuertes, conocidas como sulfuros.

Este ácido se encuentra de forma natural en el petróleo, gas natural, gases volcánicos y manantiales de aguas termales. También se encuentra en aguas pantanosas, lagunas o aguas estancadas, donde su presencia se debe principalmente a la descomposición anaerobia de restos orgánicos.

Es altamente nocivo para la salud y bastan de 20 a 50 ppm en el aire para causar malestar agudo que conlleva a la asfixia y a la muerte por sobreexposición.

5.4.1.-Proceso de obtención

Se obtiene principalmente por separación del que se encuentra contenido de forma natural en el gas natural, donde puede alcanzar el 10% de su composición total.

5.4.2.-Aplicaciones

El Sulfuro de Hidrógeno se utiliza en la fabricación de Sulfuro Sódico y Tiofenos. Se emplea en las industrias químicas para la protección del hierro o el acero contra la corrosión salina (es decir el NaCl).

Es también compuesto de partida de diversas síntesis orgánicas y en la actualidad se están realizando estudios sobre su aplicación en muy bajas dosis para incrementar la velocidad de crecimiento de algunas plantas.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

5.4.3.-Sulfuro de hidrógeno en la línea de producción

Es el producto obtenido tras la reacción de hidrodesulfuración a la que se somete la corriente de VGO en los sistemas de reacción diseñados. Tras la salida de los reactores debe eliminarse tanto el sulfuro de hidrógeno como el hidrógeno excedente, para lo que se dirigen a la unidad de aminas.

5.5.-Butano

El butano es un hidrocarburo alifático, gaseoso e inflamable, que se licúa en condiciones de presión atmosférica a la temperatura de -0,5 °C.

Su molécula está formada por cuatro átomos de carbono y 10 átomos de hidrógeno, de modo que su fórmula empírica es C_4H_{10} .

5.5.1.-Proceso de obtención

Es obtenido en la industria del refino mediante destilación fraccionada del crudo de petróleo, constituyendo una de las corrientes de cabezas.

5.5.2.-Aplicaciones

La principal aplicación del gas butano es como combustible en hogares, para la cocina y obtención de agua caliente de forma general, es también empleado como combustible de mecheros. No suele consumirse en grandes cantidades debido a sus limitaciones de transporte y almacenaje (bombonas de butano).

No es adecuado para su transporte vía gaseoductos ya que por su alta temperatura de licuefacción podría condensar en esas condiciones, de hecho se eliminan los restos de butano el gas natural por este motivo.

5.5.3.-El butano en la línea de producción

Se encuentra en la corriente de alimentación a la columna de destilación y conforma la corriente de cabezas en nuestro Proyecto, de donde se dirigirá hacia la línea de GLP dentro de la misma refinería. Se obtiene butano en las siguientes condiciones:

Butano	
Presión (atm)	14
Temperatura (°C)	96,76
Caudal másico (kg/s)	3,8
Caudal molar (mol/s)	65,52

Tabla 5.-Propiedades del butano en la línea de producción

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

5.6.-Gasoil de vacío estabilizado

Se trata del gasóleo ligero de vacío estabilizado y limpio de impurezas, el cual sale de nuestra línea de proceso por la corriente de colas de la columna de destilación para dirigirse a las unidades de FCC.

De forma general el gasóleo es un hidrocarburo líquido de densidad sobre 832 kg/m³, compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores diésel.

Su composición comprende moléculas de hidrocarburos desde 10 a 16 átomos de carbono, por simplicidad para el diseño de nuestras unidades hemos considerado que se comporta como n-hexadecano por ser este compuesto el que se emplea como referencia para la determinación del índice de cetano de los motores Diesel.

5.6.1.-VGO estabilizado en la línea de producción

Las propiedades de la corriente de nuestro VGO estabilizado son las siguientes:

Producto de colas	
Presión (atm)	14
Temperatura (°C)	323,9
Caudal másico (kg/s)	10,77
Caudal molar(mol/s)	57

Tabla 6.-Propiedades del VGO estabilizado en la línea de producción

5.7.-Fluidos auxiliares

Se dispone en la planta de los siguientes fluidos auxiliares:

- ✓ Therminol 66:

Es el fluido de transferencia térmica de fase líquida más empleado en todo el mundo por su alta temperatura de trabajo. En nuestro Proyecto es empleado como agente calefactor en el calderín y en el intercambiador que acondiciona la alimentación a la columna. Existe un circuito interno de este aceite térmico constituido por un sistema de bombeo, las conducciones necesarias y un horno que no se enmarca dentro del presente diseño.

- ✓ Aire atmosférico:

Es empleado como agente refrigerante en el condensador total de la corriente de cabezas de la columna de destilación. Aunque en principio su temperatura depende de las condiciones ambientales, se ha supuesto para el diseño una temperatura de 30°C, al considerarse dicha temperatura como la situación más desfavorable.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Condensado de alta presión:

Esta corriente de agua de condensado de alta presión viene directamente de la refinería y se utiliza para la refrigeración de los dos reactores.

✓ Vapor de alta presión:

Este es un subproducto obtenido gracias al aprovechamiento de energía que se lleva a cabo en la planta. Su valor es tanto económico como medioambiental, ya que utiliza gran parte de la energía que antes se desechaba. Por motivo de dimensiones del presente Proyecto Fin de Carrea no se han abarcado temas de integración energética pero esta corriente dispone de gran potencial para ello.

Para la obtención de este vapor se bombea agua de la red de condensado de alta presión de la propia refinería a los reactores, donde el calor excedente de la reacción exotérmica será transmitido a dicha corriente de agua generándose el vapor de agua a presión y manteniendo el sistema de reacción en condiciones isotérmicas, como se desea.

5.8.-Catalizador

El catalizador empleado en los reactores de hidrodesulfuración es un catalizador de Cobalto-Molibdeno soportado sobre alúmina (Co-Mo/Y-Al₂O₃) en su modelo comercial. Se ha seleccionado este catalizador porque es el empleado en este tipo de reactores por regla general y está recomendado en todas las referencias bibliográficas que se han consultado.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 6.-DISEÑO DEL HORNO

6.1.-Introducción

En el desarrollo de este capítulo se va a realizar el diseño de un horno industrial que sirva para calentar las corrientes de reactivos que se dirigen a los reactores de hidrodesulfuración a la temperatura de operación, que en nuestro caso particular es de 593,15 K.

Las corrientes de alimentación al horno se introducen y se calientan en el mismo por separado, para evitar contacto entre los reactivos hasta su llegada al sistema de reacción. Ambas corrientes se introducen en el horno a la temperatura de 20°C. En la tabla que se muestra a continuación se recogen las temperaturas de entrada y salida de las diferentes corrientes a calentar.

	Corriente Gasoil	Corriente Hidrógeno
Caudal molar[kmol/h]	915,84	1074,57
Cp[J/kmol·K]	672752,5	29354,52
Tent[K]	293,15	293,15
Tsal[K]	593,15	593,15

Tabla 7.-Corrientes de alimentación al horno

Realizando el correspondiente balance de energía (ver **Anexo 2** de la Memoria), se consigue obtener el calor que es necesario aportar para que ambas corrientes alcancen la temperatura deseada.

Qnecesario total[J/h]	6,96E+10
-----------------------	----------

Este calor es el que tendrá que aportar el combustible que se elija en el diseño como fuente de calor.

6.2.-Normativa

Este equipo está diseñado bajo el código Estándar API (*American Petroleum Institut*) en concreto el API 560 "*Fired Heater for General Refinery Services*" donde se han consultado y seguido todas las especificaciones. Además, tanto para el dimensionamiento como el detalle en los cálculos de los tubos del horno de procesos y su material se ha seguido el código estándar API 530 "*Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries*". El primero de ellos, data de 1998 y el segundo es de 2003.

6.3.-Descripción general de un horno de procesos

Un horno de procesos es un equipo formado por un cerramiento metálico revestido interiormente por una pared refractaria aislante, dentro de la cual se dispone un serpentín tubular por el que circula un producto que se desea calentar o evaporar a través del calor

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

liberado por un combustible sólido, líquido o gaseoso que se inyecta convenientemente en el sistema.

En el quemador se produce la reacción de combustión que genera una masa de gases calientes que son los productos de combustión. Estos gases entregan el calor por radiación al serpentín y salen por la chimenea.

Del calor liberado en la combustión, una parte es aprovechada en el calentamiento del producto, otra parte se pierde por chimenea, dado que los humos que salen por la misma aún están calientes, y también habrá una pérdida por conducción a través de las paredes del refractario.

La eficiencia que se ha obtenido para el horno que se diseña es de:

$$Eficiencia = 85\%$$

La ineficiencia se debe a las pérdidas de calor en las paredes del horno (un 2% es un valor aceptable en el diseño) y a las pérdidas en los gases producidos.

Teniendo en cuenta el calor que se necesita para calentar los fluidos y la eficiencia del horno, el calor liberado cuando se lleva a cabo la reacción de combustión es de:

$$Q_{\text{liberado}_{TOTAL}} = 22851,48 \frac{kJ}{s}$$

6.4.-Equipos disponibles y selección del más adecuado

En este apartado se expondrán los diferentes tipos de horno industrial disponibles y se justificará la elección del más adecuado para el diseño que nos ocupa.

Los hornos de proceso son por lo general equipos de gran porte, esto es debido a que para lograr un alta densidad de flujo de calor radiante es necesaria una buena emisividad del gas, el cual es a su vez función del volumen, siendo por lo tanto necesario que el hogar o cámara sea de grandes dimensiones.

6.4.1.-Tipos de hornos de proceso

Por regla general, los hornos de proceso se dividen en tres partes bien diferenciadas que son:

✓ Sección radiante: Los tubos están en presencia de la llama. En esta parte la transmisión de calor es por radiación en un 80 % aproximadamente y un 20 % por convección de la circulación de gases calientes alrededor de los tubos.

✓ Sección de convección: Los tubos están fuera del alcance de la llama. Los gases calientes se dirigen a través del banco de tubos. El calor transmitido es por radiación de CO_2 y H_2O en los gases calientes además del calor por convección. Los tubos están equipados con aletas para mejorar las condiciones de transmisión de calor.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Sección de choque: Las primeras filas de tubos del área de convección son la zona de choque. En ella los tubos no tienen aletas, reciben la misma cantidad de calor por ambos mecanismos.

Existen varios tipos constructivos de hornos de proceso, pero en general, todos responden a alguno de los tres tipos básicos que se presentan a continuación.

→ Horno cilíndrico vertical

Es el tipo más difundido. La sección radiante es una cámara cilíndrica y los tubos en esta sección están dispuestos verticalmente en un círculo alrededor de los quemadores. Los quemadores están ubicados en el piso, de modo que la llama se ubica paralela a los tubos. El piso del horno debe estar elevado respecto del terreno para permitir el mantenimiento y acceso a los quemadores desde abajo.

La sección convectiva de estos hornos se presenta en la parte superior. Ésta consiste en un banco de tubos cuya longitud es aproximadamente igual al diámetro de la sección radiante. Los dos filas inferiores del banco convectivo dan a la cámara radiante, y por lo tanto reciben calor por radiación de ésta.

Estos tubos forman parte de la llamada zona de choque ya que protegen de la radiación a los tubos que se encuentran más arriba.

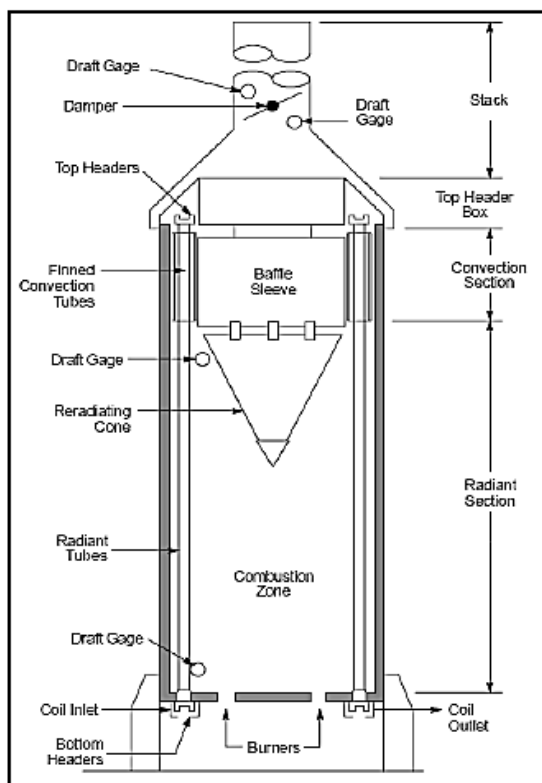


Figura 4.-Horno cilíndrico vertical

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

→ Hornos tipo cabina y tipo caja (Box heaters)

Estos hornos son de sección recta y normalmente los tubos se instalan en posición horizontal.

El horno tipo cabina tiene la parte superior de la cámara radiante inclinada. Esta parte del horno (en inglés “arch”), y los tubos se disponen en las paredes laterales y en el arco. En los tipos caja, sin embargo, el arco es horizontal.

En la sección de radiación los tubos están montados horizontalmente en la pared lateral más larga en una capa simple. Se pueden montar varias series de tubos en paralelo en función del caudal, donde se colocarán a una distancia de la pared de 1,5 veces el diámetro de tubería.

La sección de convección se extiende a lo largo del horno, por lo que usualmente se pueden usar tubos más largos que en los hornos cilíndricos. Ésta se monta directamente sobre la zona de radiación y consiste en un banco de tubos con distribución triangular equilátera y una separación de dos veces el diámetro de tubería.

Los quemadores pueden ser de varios tipos dependiendo de donde se distribuyan: inferiores (, laterales y finales. La ventaja de tenerlos en las paredes laterales es de no requerir espacio para el mantenimiento debajo del piso del horno, con lo que el soporte se haría más sencillo ya que el horno se apoya en dicho caso sobre una base plana.

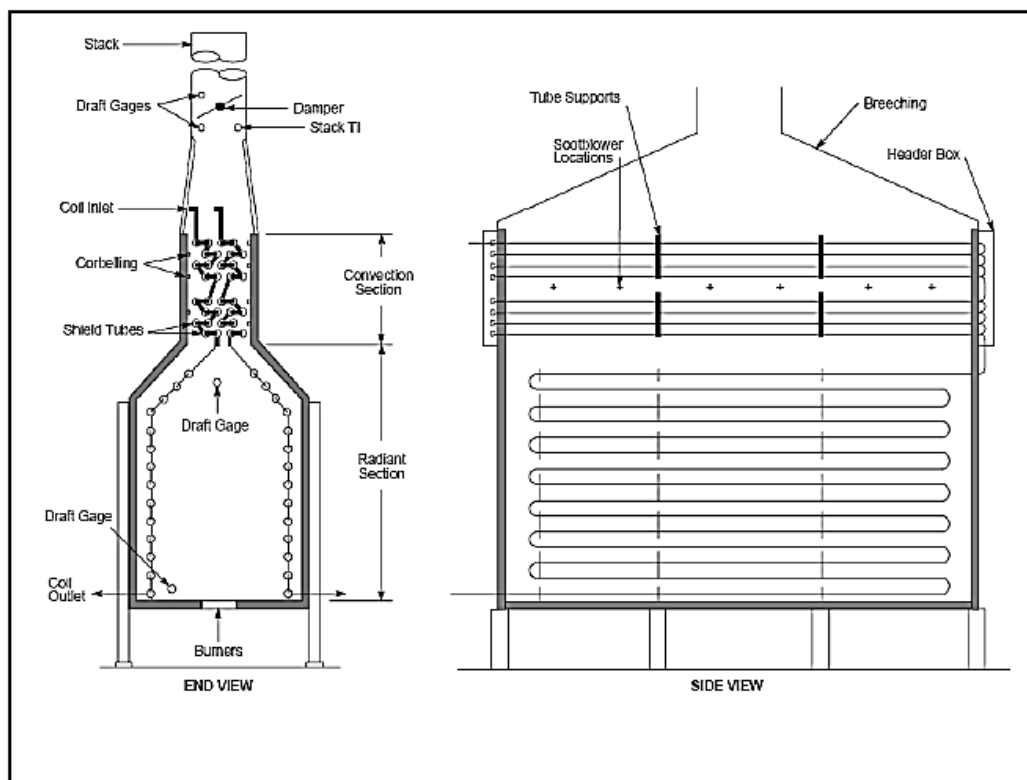


Figura 5.-Horno tipo cabina

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

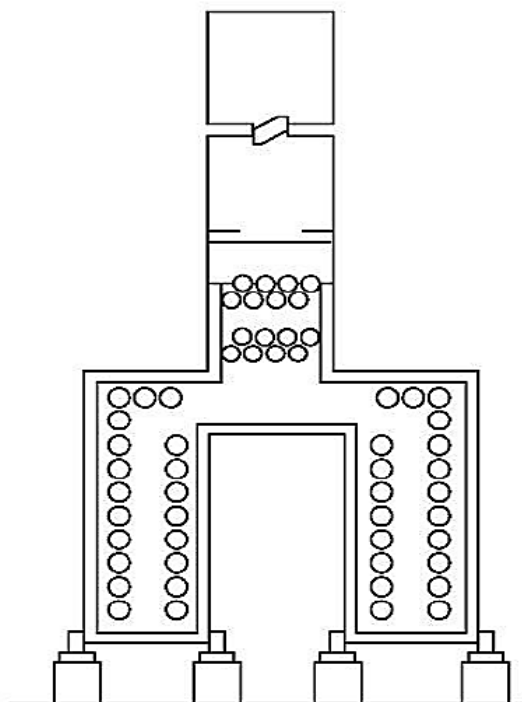


Figura 6.-Horno tipo caja con doble cámara

Estos tipos de hornos pueden tener diferentes configuraciones, de este modo para permitir usar un mismo horno para dos servicios de procesos diferentes, existen los llamados de doble cabina, donde se puede regular el flujo de calor a cada una de las cámaras radiantes.

No obstante, dado que las dos cámaras se influyen mutuamente, con una de ellas trabajando a máxima capacidad no se podría bajar el servicio de la otra a menos del 75 al 50 % (dependiendo de si los dos servicios comparten o no la sección convectiva). Tampoco es posible interrumpir la circulación en una de las cámaras con la otra funcionando, porque esto produciría el quemado de los tubos.

6.4.2.-Selección del horno para la planta a diseñar

Para cubrir las necesidades en el diseño de la unidad de hidrodesulfuración se ha seleccionado un horno del tipo caja con doble cámara y zona convectiva común, el cual es de sección recta y los tubos se instalarán en posición horizontal.

El horno de proceso está constituido por 6 paredes, dos de las cuales son internas, dos suelos y un techo elaborado en acero con aislamiento interior de ladrillos refractarios. Además, el horno tiene la parte superior de la cámara radiante dispuesta en horizontal, mientras que los tubos se disponen en las paredes laterales y el arco.

Dado que la eficiencia energética de los hornos de proceso es baja, por regla general, se instalará un haz de tubos en el camino de salida de los gases antes de que pasen a la chimenea. Puesto que estos gases ya se han enfriado el mecanismo predominante en esta zona es la convección. Sabiendo esto, la sección de convección se sitúa en la parte superior y tras ella se monta la zona denominada chimenea.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Este tipo de hornos permiten el empleo de tubos más largos, debido a que éstos también se disponen horizontalmente en la zona de convección. Este es el motivo principal por el que se ha seleccionado un horno tipo caja, pues al trabajar con caudales grandes se necesita una gran área de transferencia de calor.

Con el fin de aprovechar mejor las diferencias de temperatura el fluido de proceso ingresará en primer lugar en la zona de convección, pasando luego a la zona radiante, circulando de este modo a contracorriente con los humos o gases de combustión (manteniendo así un mayor gradiente de temperaturas).

6.5.-Combustible utilizado y exceso de aire

Se conoce con el nombre de combustión a la reacción química entre el oxígeno y un combustible que libera calor.

Cuando hay suficiente oxígeno para convertir todo el combustible en CO₂ y H₂O, principales productos de toda reacción de combustión, diremos que tiene lugar la combustión completa. Por otro lado, cuando la cantidad de oxígeno es insuficiente, el combustible no alcanzará a quemarse por completo y encontraremos entre los productos combustible que no se ha consumido y CO además del dióxido de carbono y del agua.

Con el fin de asegurar que la combustión se completa, en los quemadores industriales la cantidad de oxígeno empleada para este tipo de reacciones siempre es superior a la estequiométrica, facilitando así que el combustible pueda reaccionar por completo.

Cuando se emplean combustibles gaseosos, como puede ser el gas natural, se suele emplear un exceso de aire comprendido entre el 10 y el 15 %. Si lo que se queman son combustibles líquidos se requiere un mayor exceso de aire puesto que resulta más complicado obtener una buena mezcla del aire con el combustible, en dichos casos el exceso de aire suele ser del orden del 25%. Además, será necesario en estos casos utilizar vapor de agua para atomizar el combustible líquido y facilitar la mezcla.

En el diseño del presente horno de proceso el calor será suministrado por medio de la combustión de gas natural, ya que es el combustible del que generalmente disponen con facilidad las refinerías. El porcentaje de aire en exceso seleccionado en nuestro proceso en particular será de un 10%.

El gas natural contiene metano, etano y otros gases en menor proporción. Dado que en un 90% de su composición es metano, por simplificaciones de diseño consideraremos que todo el combustible se comporta como tal a partir de este momento, siendo la reacción química que tiene lugar:



6.5.1.-Poder calorífico del combustible

Una vez que se ha elegido el combustible es necesario definir un término muy importante del mismo, denominado poder calorífico, que es la cantidad de calor que se libera en la combustión completa de una unidad de combustible.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En el caso que nos ocupa, como la temperatura de evacuación de los gases a la chimenea es mayor que la correspondiente a la condensación del agua, el vapor de agua no condensará, por lo que es necesario emplear el Poder Calorífico Inferior, el cual se obtiene a partir del Poder Calorífico Superior, restándole el calor latente de condensación del vapor de agua.

Para dejar más claro este asunto, se incluyen a continuación las definiciones de ambos términos recogidos de la bibliografía:

El Poder Calorífico Superior es la cantidad de calor que se obtiene en la combustión completa de una unidad de combustible, al enfriar los gases de combustión a 0°C a presión atmosférica, quedando el agua existente en forma líquida.

El Poder Calorífico Inferior es la cantidad de calor que se obtiene en la combustión completa de una unidad de combustible, al enfriar los gases de combustión a 0°C a presión atmosférica, quedando el agua existente en forma vapor.

Para determinar el PCI del metano hemos recurrido a la bibliografía (Wauquier J.P; 1993):

$$PCI_{\text{metano}} = 50000 \text{ kJ / kg}$$

6.5.2.- Caudales requeridos de gas natural y de aire

En el **Anexo 2 de la Memoria**, se ha desarrollado el proceso de cálculo necesario para obtener las cantidades de gas natural y de aire que se requieren para calentar las corrientes de reactivos hasta los 593,15 K. Los resultados se recogen en la siguiente tabla:

Corriente	Wmetano[kg/s]
Gasoil	0,395
Hid/met	0,062
Total	0,457

Tabla 8.-Caudales de combustible y aire

6.6.-Elementos que conforman el horno

Los elementos principales que constituyen el horno de proceso son los tubos, los quemadores, la chimenea y el sistema de tiraje, los recuperadores de calor y el sistema de control (no desarrollamos el diseño de éste en el presente Proyecto).

6.6.1.-Tubos

Los tubos de la sección radiante tienen por norma un diámetro nominal que debe estar comprendido entre las 2 y las 10 pulgadas. La API 530 define los materiales que pueden usarse y define el procedimiento para realizar el diseño mecánico de los mismos, recogiendo también los espesores de corrosión en función del material elegido.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

De este modo se nos indica que la selección del material a emplear debe basarse en la temperatura de trabajo del metal, la cual será superior a la temperatura del fluido de proceso. Adicionalmente, debemos tener presente que dicha diferencia de temperaturas tiende a incrementarse con el tiempo debido a la formación de coque sobre las superficies interiores de los tubos.

El material que hemos seleccionado en nuestro diseño de los tubos de la sección radiante es acero inoxidable 316 L, el cual cumple los requisitos de diseño para los reactivos empleados así como la temperatura de trabajo, como podemos comprobar en la siguiente tabla.

Materials	Type or grade	Limiting design metal temperature	
		°C	(°F)
Carbon steel	B	540	(1 000)
C-3/4Mo steel	T1 or P1	595	(1 100)
1/4Cr-1/2Mo steel	T11 or P11	595	(1 100)
2/4Cr-1Mo steel	T22 or P22	650	(1 200)
3Cr-1Mo steel	T21 or P21	650	(1 200)
5Cr-1/2Mo steel	T5 or P5	650	(1 200)
5Cr-1/2Mo-Si steel	T5b or P5b	705	(1 300)
7Cr-1/2Mo steel	T7 or P7	705	(1 300)
9Cr-1Mo steel	T9 or P9	705	(1 300)
9Cr-1Mo-V steel	T91 or P91	650 ^a	(1 200 ^a)
18Cr-8Ni steel	304 or 304H	815	(1 500)
16Cr-12Ni-2Mo steel	316 or 316H	815	(1 500)
16Cr-12Ni-2Mo steel	316L	815	(1 500)
18Cr-10Ni-Ti steel	321 or 321H	815	(1 500)
18Cr-10Ni-Nb steel	347 or 347H	815	(1 500)
Ni-Fe-Cr	Alloy 800H/800HT	985 ^a	(1 800 ^a)
25Cr-20Ni	HK40	1 010 ^a	(1 850 ^a)

Tabla 9.-Temperatura máxima de diseño de los tubos

Los tubos de la sección de radiación son lisos, mientras que los de la sección de convección empujan superficies extendidas, las cuales pueden ser aletas transversales o espigas soldadas al tubo.

Estas espigas deben tener por norma un diámetro mínimo de media pulgada y una altura máxima de una pulgada. Durante la selección de sus dimensiones el principal factor a tener en cuenta es la posterior dificultad de limpieza, pero dado que en nuestro diseño el combustible es gaseoso consideraremos que no se produce ensuciamiento apreciable.

Respecto de los retornos de un tubo a otro, mencionar que se hacen con curvas en forma de U, quedando dentro de la cámara radiante en dicha zona, mientras que en la zona convectiva se utilizan placas de tubos.

En el **Anexo 2 de la Memoria**, correspondiente al diseño del horno, se ha desarrollado un extenso cálculo basado en la velocidad de los fluidos por el interior de los tubos, el cual nos ha permitido determinar el diámetro de los tubos para las corrientes de los reactivos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Corriente	VGO	Hidrógeno
W[lb/s]	70,17	1,78
D _{nom} [in]	10	1,6
D _o [in]	10,75	2,38
D _i [in]	9,75	1,86
Sección de tubo[ft ²]	0,518	0,019
G comb necesario[lb/s·ft ²]	135,45	94,73

Tabla 10.-Datos de los tubos del horno

6.6.2.- Quemadores

Como hemos mencionado en apartados anteriores, los quemadores del horno que estamos diseñando se sitúan en la zona inferior.

En el diseño de quemadores es necesario considerar un sobredimensionamiento con respecto a las necesidades requeridas, para evitar que en condiciones adversas no se pueda alcanzar la temperatura deseada en las corrientes. Además de esto, siempre se instalarán en los quemadores pilotos de reencendido instantáneo en caso de apagado de la llama, los cuales son pequeños quemadores auxiliares independientes.

Los quemadores de este tipo bien podrían trabajar con tiro natural, pero siempre es aconsejable instalar ventiladores que obliguen al tiro forzado, lo que nos permite trabajar a mayor capacidad. Los quemadores de tiro forzado instalan además un sistema de emergencia para que en caso de fallo del ventilador se abra una compuerta que permita la entrada de aire atmosférico.

6.6.3.-Chimenea y sistema de tiraje

Por cuestiones de diseño, la presión en la cámara de combustión de un horno será siempre inferior a la presión atmosférica. Esta depresión se conoce como tiraje y es provocada por la chimenea.

El tiraje o depresión producida por la columna de gases de combustión calientes, depende de la diferencia de densidades entre el aire atmosférico y la columna de gas.

Como consecuencia de las pérdidas de calor, la temperatura de los humos en el tope de la chimenea es bastante menor que en la base de la misma. Adicionalmente el tiraje de la chimenea debe compensar la pérdida de carga sufrida al atravesar el banco convectivo y el propio conducto de la chimenea.

El desarrollo del diseño de la chimenea se encuentra detallado en el **apartado 2.10 del Anexo 2**.

6.6.4.-Recuperadores de calor

Si se considera oportuno, es posible recuperar parte del calor residual de los humos para precalentar la entrada de aire, aumentando así el rendimiento térmico del horno.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En el presente Proyecto no se aborda el diseño de los mismos. No obstante se explica a continuación el funcionamiento de los mismos y sus posibilidades.

El objetivo de los recuperadores de calor sería tomar los gases de combustión a la salida de la zona convectiva mediante un ventilador de tiro inducido que los haga circular a través de un intercambiador de calor, que tiene la misión de precalentar el aire fresco que se alimenta al horno. Este aire fresco, a su vez, circula por el precalentador y los quemadores impulsado por un ventilador de tiro forzado. Mientras tanto, los humos fríos que salen del intercambiador pasan a la chimenea para ser evacuados.

6.6.5.-Temperaturas del fluido y de los gases de combustión

Las temperaturas puestas en juego en el horno de procesos se han calculado en el **Anexo 2**, tras un intenso cálculo de iteraciones y estimaciones acordes a la normativa. Es conveniente recordar que los reactivos pasan a contracorriente de los gases por el interior del horno y que su entrada es por la sección de convección, mientras que los gases salen calientes de los quemadores, dispuestos en el piso del horno.

En la siguiente tabla se recogen los valores de las temperaturas de los fluidos a medida que realizan su paso por el horno.

Temperaturas	°F	K
Entrada sección de convección(T_{in})	68	293
Entrada sección de choque(T_{sf})	205,3	369,3
Entrada sección de radiación(T_{bw})	238	387,4
Salida del horno(T_{out})	631,7	606,2

Tabla 11.-Temperatura de los fluidos en las distintas secciones del horno

6.7.-Diseño del horno

Llegados a este punto debemos tener claro que el horno se divide en tres zonas diferenciadas, cada una de las cuales tiene un número diferente de tubos a los que el combustible les cede cantidades diferentes de calor.

A lo largo de este apartado desarrollaremos el diseño de cada una de las partes, estando los cálculos necesarios explicados en extensión en el **Anexo 2**, correspondiente al diseño del horno.

6.7.1.-Dimensiones del horno

Para hornos de tubos horizontales con quemadores en el piso, como es el caso, se fijan límites a la relación altura/anchura para asegurar una densidad de calor uniforme dentro del horno.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Hornos rectangulares
<u>Dimensiones en orden creciente</u>
1-1-1 a 1-1-3
1-1-2 a 1-2-4
1-1-4 a 1-1- ∞
1-2-5 a 1-2- ∞
1-3-3 a 1-3- ∞

Tabla 12.-Dimensiones de hornos rectangulares (largo, ancho y alto)

Las relaciones presentadas en esta tabla pueden tomarse en cualquier orden. La relación escogida para nuestro horno (caja con doble cámara) es:

1-2-4

De modo que la las dimensiones del horno que estamos diseñando serían las siguientes:

Dimensiones de la cámara radiante	L[ft]	60
	H[ft]	30
	W[ft]	15

Tabla 13.-Dimensiones del horno diseñado

Siguiendo la normativa los tubos montados en la pared deben estar al menos a 4 pulgadas de la pared interior o 1,5 veces el diámetro nominal, tomándose siempre el mayor de estos valores.

El valor más alto en nuestro diseño es el de 4 in, como podemos ver en el **apartado 2.8.4 del Anexo 2**.

6.7.2.-Diseño de la sección de radiación

El objetivo que se persigue en este apartado es conocer el calor que cede el combustible a la zona de radiación y con esto la fracción de calor liberado que es absorbido en esta zona.

Se estima también el área refractaria, que es el área no cubierta por los tubos que está disponible en el horno y se cerrará el diseño hallando el número de tubos que se disponen en esta zona.

Para poder conocer todos los datos de la zona de radiación debemos realizar una estimación, en la cual se supone un flujo de calor a partir del cual realizaremos el resto de los cálculos. Posteriormente debemos comprobar que ese calor supuesto coincide con el calculado, entrando así en un proceso iterativo cuya resolución resulta tediosa.

Con el fin de simplificar en la medida de lo posible el proceso de cálculo iterativo aplicaremos el método de Lobo-Evans, en el que se simplifica la geometría del sistema sustituyendo la geometría tubular por una superficie plana ficticia; considerando los gases calientes como un cuerpo radiante y los tubos como un plano frío de absorción de radiación.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En el **apartado 2.8.4 del anexo 2**, se explica con detalle el proceso iterativo llevado a cabo y se podrán seguir los pasos de cálculo con detalle. En la siguiente tabla se recogen las características generales de la sección de radiación obtenida tras realizar los cálculos ya comentados.

Corriente	VGO	Hidrógeno
Calor liberado, Q_{liberado} [kJ/s]	19746,25	3105,22
Calor cedido a la zona de radiación, Q_R [kJ/s]	10761,71	1692,35
Área refractaria, A_R [m ²]	284,29	44,71
Nº tubos de la zona de radiación	19	13

Tabla 14.-Característica de la sección de radiación

6.7.3.-Diseño de la sección de convección

La sección de convección comprende dos secciones bien diferenciadas, las parte de los tubos de choque, que son los que separan la zona de radiación de la zona de convección, y los tubos con aletas.

El proceso que hemos seguido para su diseño es similar a la que realizaremos en los intercambiadores de calor, aunque en este caso debemos calcular todas y cada una de las temperaturas puestas en juego.

Para la zona de tubos con aletas se aplican las ecuaciones correspondientes a la transmisión de calor por convección, debemos prestar atención al cálculo del área de intercambio para calcularla correctamente.

El dimensionamiento de la zona de convección comprende únicamente la altura de la misma, siendo así tanto para tubos de choque como para los tubos con aletas. El total de filas en la zona completa de completa de convección puede verse en el **apartado 2.9.2.4 del Anexo 2** donde se expone la ecuación empleada para determinar la altura de la sección de convección que, en el horno diseñado, toma el valor de :

$$H_{\text{conv}} = 8,366 \text{ ft}$$

Por otro lado, las dimensiones de las aletas de los tubos en esta sección según las especificaciones y estándares para el tipo de horno seleccionado se recogen en la siguiente tabla:

Altura de las aletas, H [in]	0,75
Espesor de las aletas, t [in]	0,105
Número de aletas por pulgada de tubo, f_{pi}	3

Tabla 15.-Característica de las aletas

Los datos de dimensiones de los tubos de choque y los correspondientes a la aplicación del balance de energía al horno se recogen en las tablas que se presentan en el **apartado 2.9.2 del Anexo 2 de la Memoria**.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

6.7.4.-Diseño de la chimenea

La altura de la chimenea depende normalmente de requisitos de contaminación atmosférica por dilución de humos, según el área en el que se construye el horno y la legislación aplicable en dicha área geográfica. También hay que tener en cuenta el tiro o draft de la chimenea cuando éste es de tipo natural.

Se conoce como tiro a la diferencia de presión entre la presión atmosférica y la presión en el interior de la chimenea a una misma altura, indicado en pulgadas de agua.

La presión en el interior del horno y la chimenea debe ser siempre inferior a la que hay en el exterior, ya que la dirección de los fluidos va siempre de mayor a menor presión. En el borde de la chimenea esta presión debe ser mayor a la ambiente para favorecer la salida de gases.

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos tras el desarrollo de los cálculos, que puede consultarse en el **apartado 2.10 del Anexo 2**.

Características	
Pérdida de temperatura en la chimenea[°F]	25
Temperatura del aire[°F]	68
Velocidad lineal en la chimenea[ft/s]	80
Temperatura de salida de los gases[°F]	619,17
Caudal volumétrico[ft ³ /s]	498
Dimensiones chimenea	
Altura chimenea[ft]	100
Sección chimenea[ft ²]	12,57
Diámetro chimenea, D _{stack} [ft]	4
Velocidad másica, G _{gas} [lb/ft ² ·s]	1,63
Pérdidas de presión en la chimenea	
A la salida de la chimenea[in H ₂ O]	0,19
A lo largo de la chimenea[in H ₂ O]	1,45
Draft o tiro[in H ₂ O]	0,65
Pérdida total en chimenea[in H ₂ O]	-0,99

Tabla 16.-Diseño de la chimenea

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 7.- DISEÑO DE LOS REACTORES DE HIDRODESULFURACIÓN

7.1.-Introducción

El proceso de reacción que tiene lugar en el presente Proyecto Fin de Carrera comprende el diseño de dos reactores multitubulares catalíticos del tipo trickle-bed, idénticos y dispuestos en paralelo, donde se lleva a cabo la eliminación del azufre presente en la corriente de gasóleo ligero de vacío (VGO) mediante una reacción de hidrodesulfuración.

Las corrientes de reactivos entran al sistema de reacción por separado, ambas en las condiciones de operación. Para alcanzar dichas condiciones estas corrientes han pasado previamente por un horno de proceso en el que se alcanza la temperatura deseada y se ha impulsado al reactor empleando un sistema de bombeo que asegura que se alcancen las condiciones de presión adecuadas durante el proceso de reacción.

Ambas corrientes se mezclan en el difusor de entrada de los reactores donde se ponen en contacto. A partir de este momento ambos fluidos atraviesan el reactor en flujo paralelo, condiciones óptimas de operación según bibliografía (Jiménez et al; 2007, Jarullah et al; 2011). Durante este trayecto el hidrógeno (gas) debe difundir a través del VGO (líquido), para que seguidamente los reactivos difundan a través del catalizador (sólido) donde tendrá lugar la reacción química. Todo esto se explica con más detalle en el **apartado 1.6.2 del Anexo 1**.

Una vez las corrientes salen del reactor tendremos los productos que se han formado durante la reacción, las especies propias generadas como consecuencia del craqueo que tiene lugar en este tipo de procesos, así como el hidrógeno en exceso que no se haya consumido.

Puesto que tenemos dos reactores idénticos, ambas corrientes deberían tener idealmente la misma composición de modo que mezclaremos ambas corrientes en un punto de mezcla antes de dirigirlas hacia la unidad de separación de gases y eliminación del H₂S formado. A este conjunto de unidades de proceso la hemos denominado unidad de aminas, la cual tratamos como un modelo de caja negra, por los motivos que ya se expusieron en el capítulo 2 de la Memoria.

La corriente de salida de la unidad de aminas es la misma que la de salida de los reactores con la diferencia de que ahora solo nos quedan los hidrocarburos, puesto que se habrán eliminado por completo el resto de especies químicas.

Para hacernos una idea más clara de cómo se reparten las corrientes y la composición de las mismas en cada etapa del proceso es conveniente consultar los apartados 1.2 del **Anexo 1** y 2.1 del **Anexo 3**.

En el presente capítulo se pretende explicar las bases de diseño de los sistemas de reacción empleados, así como dar una visión descriptiva de la que en ellos sucede. En el **Anexo 3 de la Memoria** se detallan los cálculos realizados, simplificaciones y justificaciones pertinentes para el diseño de estos equipos.

Es importante recalcar que en el **Anexo 3** se recoge información que bien podría haberse incluido en este apartado de la Memoria, como la que hace referencia a las

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

características de los reactores heterogéneos, pero se ha preferido incluir esa información en el anexo para entender el proceso de cálculo y por qué se han ido eligiendo esas ecuaciones y sus convenientes simplificaciones. Por este motivo dicho anexo es más extenso y completa en gran medida el presente capítulo.

7.2.-Criterio de diseño y selección

La característica principal que tiene la reacción de interés en este proceso es que es exotérmica (libera calor), de modo que la temperatura en el reactor aumentaría de manera que se superarían los valores de temperatura que se han de evitar para que no se produzca coquización.

Para evitar que esto suceda debemos retirar el calor generado por la reacción química empleando un sistema de refrigeración, manteniendo así el sistema de reacción en régimen isotérmico, es decir, a temperatura constante.

Con el fin de cumplir este objetivo se ha seleccionado un diseño del tipo reactor multitubular, el cual se diseña como un intercambiador de carcasa y tubos tipo AET, permitiendo así un mejor control de la temperatura. Ya que la opción de un reactor tubular simple hubiese ocasionado la generación de perfiles de temperatura, problemas de sinterización del catalizador, etc.; complicando así el diseño de forma innecesaria.

Por el interior de los tubos fluyen las corrientes de reactivos atravesando el lecho de catalizador, mientras que por el exterior circula una masa de agua condensada a alta presión cuya misión es la de mantener el sistema a temperatura constante.

El hecho de que se diseñen dos reactores idénticos viene justificado por el gran volumen de reacción necesario para tratar los 143.000 L/h de VGO, como puede verse con más detalle en el **apartado 1.10 del Anexo 1**. Por este motivo se diseñarán dos reactores de 32,5 m³ de capacidad cada uno.

7.3.-Condiciones de operación

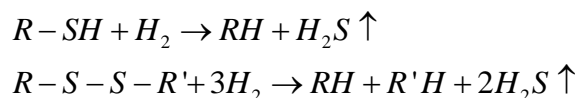
Las condiciones de operación que se imponen en nuestro diseño son fruto de la experiencia acumulada durante años por la industria del refino, la cual ha establecido el rango de trabajo en el cual el proceso de hidrodesulfuración resulta más eficaz (Raseev S.; 2003). De este modo las condiciones de operación empleadas son:

- Temperatura de operación de 320 °C
- Presión de operación de 10 atmósferas (10,13 bar)
- Régimen de trabajo isotérmico

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.4.-Cinética de reacción

Las reacciones que tienen lugar durante el proceso de hidrodesulfuración son muy diversas debido a la compleja composición de los VGO. Sin embargo para el desarrollo de nuestro diseño vamos a considerar que la reacción principal a tener en cuenta es la siguiente:



Que en su forma más simple no es más que la combinación de hidrógeno y azufre, para dar sulfuro de hidrógeno. Siendo esta última la que tomaremos de ahora en adelante.

Como se explica en el **apartado 1.4 del Anexo 1**, la ecuación de cinética de reacción se toma de la bibliografía y se obtiene de aplicar el modelo de Langmuir-Hinshelwood. Su expresión viene dada por la ecuación:

$$r_{HDS} = K_{HDS} \frac{(C_{sul}^S)^n (C_{H_2}^S)^m}{(1 + K_{H_2S} C_{H_2S}^S)^2}$$

Donde la constante cinética tiene la siguiente expresión:

$$K_{HDS} = A_{HDS}^0 \exp\left(-\frac{EA_{HDS}}{RT}\right)$$

Para que esta reacción sea la más favorecida de todas se recomienda (Jiménez et al; 2007, Jarullah et al; 2011) que se introduzcan los reactivos de tal modo que la relación molar de Hidrógeno frente a azufre sea de 6:1. De este modo podremos considerar que las estimaciones realizadas nos conducirán a un modelo que describa lo que sucede en la realidad, y sea por lo tanto satisfactorio.

Todo el conjunto de simplificaciones y consideraciones que se han tenido en cuenta, así como todo el desarrollo de cálculos y obtención de las ecuaciones se encuentra exhaustivamente explicado en el **Anexo 1 de la Memoria**.

Es de interés la lectura del **apartado 1.7 del Anexo 1**, en el que se obtienen las ecuaciones de diseño empleadas en el diseño de nuestros sistemas de reacción.

Con el objetivo de no hacer más denso el presente Proyecto y dado que todo lo referente a los sistemas de reacción se encuentra perfectamente detallado en su correspondiente anexo, no nos extenderemos más en este apartado, limitándonos a exponer gráficas que ponen de manifiesto que el modelo obtenido se ajusta a lo esperado.

Se presentará en primer lugar el resultado que se espera obtener según las referencias bibliográficas consultadas (Jiménez et al; 2007, Jarullah et al; 2011, Raseev S.;2003), y en segundo lugar los resultados obtenidos tras aplicar las simplificaciones de diseño que hemos tomado en nuestro Proyecto. Se comprueba que la evolución de las variables estudiadas son muy similares, si bien no idénticas debido a las diferencias existentes en las condiciones de operación.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

		ENTRADA		SALIDA	
GASOIL		Kg/s	mol/s	Kg/s	mol/s
Aromáticos	Monoaromáticos	0,726	8,642	0,470	4,431
	Diaromáticos	0,594	4,431	0,927	6,022
	Triaromáticos	1,108	6,022	-	-
Cíclicos		5,572	63,317	-	-
Lineales		7,124	19,900	9,552	39,799
TOTAL GASOIL		15,124	102,312	10,949	50,252
AZUFRE		0,796	24,874	0,008	0,249
HIDRÓGENO		0,299	149,250	0,249	124,620
BUTANO		-	-	4,174	71,959
SULFURO DE HIDRÓGENO		-	-	0,837	24,626
TOTAL		16,218	276,436	16,217	271,706

Tabla 17.-Balance de materia al horno

→CONVERSIÓN FRENTE A TEMPERATURA

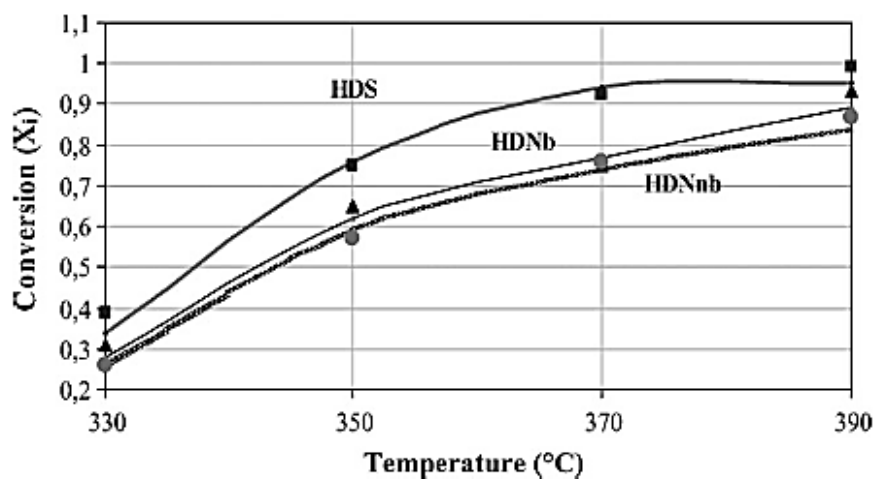


Figura 7.-Conversión vs temperatura teórica

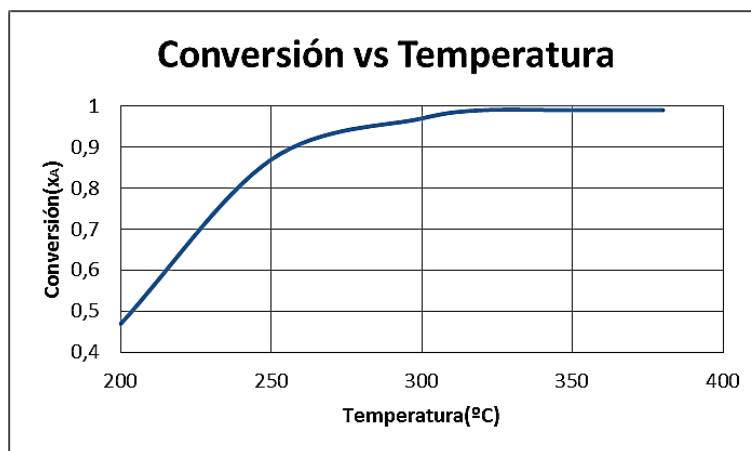


Figura 8.-Conversión vs temperatura obtenido

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

→PERFIL DE CONCENTRACIÓN DEL AZUFRE

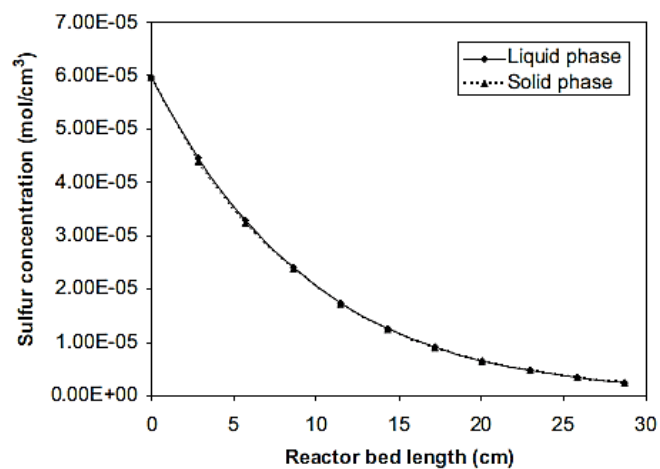


Figura 9.-Concentración de azufre en el reactor teórica

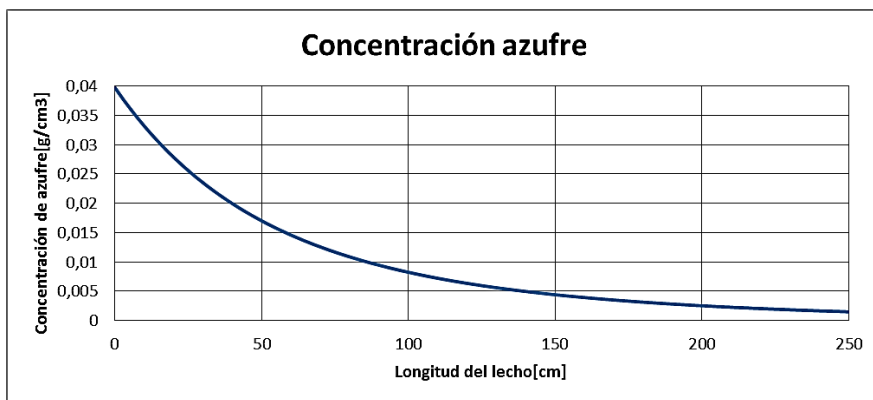


Figura 10.-Concentración de azufre en el reactor obtenida

→PERFILES DE CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO Y SULFURO DE HIDRÓGENO

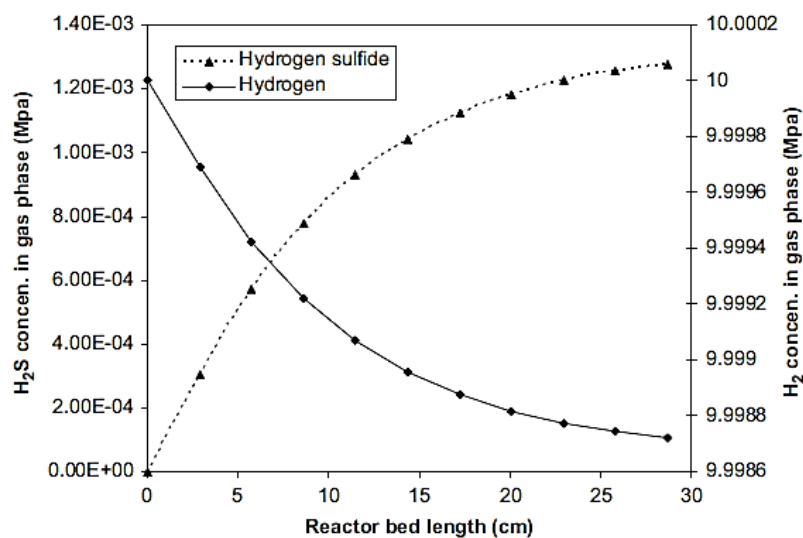


Figura 11.-Perfiles de concentración teórica

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

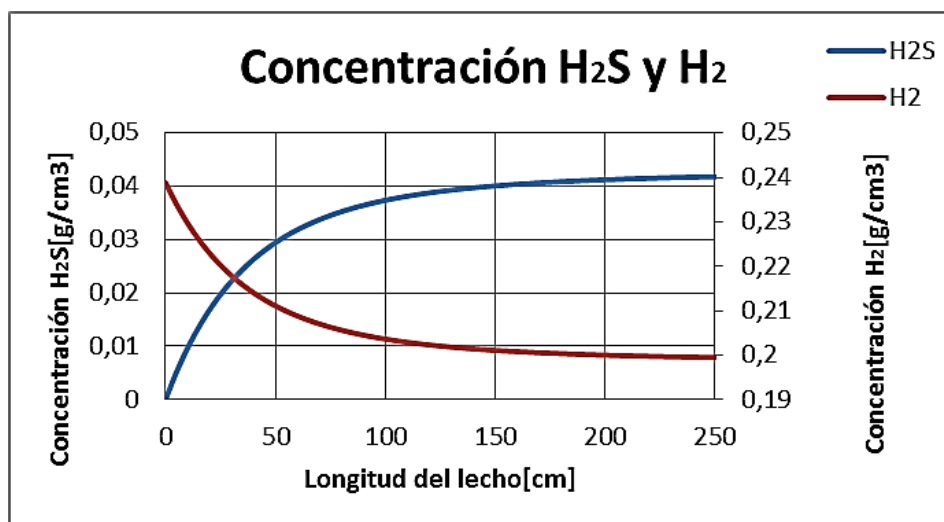


Figura 12.-Perfiles de concentración obtenidos

7.5.-Caracterización de la corriente de refrigeración

Puesto que deseamos mantener los sistemas de reacción en régimen isotérmico, se necesita una corriente que nos permita mantener la temperatura de 593,15 K constante.

Para cumplir este cometido se ha seleccionado una corriente de agua condensada a alta presión de la red de agua de la propia refinería. El fluido refrigerante fluye a contracorriente y es necesario un caudal de 0,21 kg/s para que cumpla su función de retirar el calor que desprende la reacción exotérmica que tiene lugar en el interior de los tubos.

El calor absorbido por esta agua de refrigeración es empleado para su paso a fase vapor. Este vapor a alta presión se destina a otros usos dentro de la refinería por lo que conseguimos un aprovechamiento energético.

El proceso de cálculo y la cantidad de calor retirada puede consultarse en el **Anexo 1**, donde a partir del apartado 1.17 se explica con detalle todo lo relacionado con balances de energía a los sistemas de reacción.

7.6.-Unidades de reacción

Como ya hemos mencionado con anterioridad en el desarrollo de este capítulo, tendremos dos reactores idénticos dispuestos en paralelo donde las corrientes VGO (que contienen el azufre a eliminar) y de hidrógeno se mezclarán en el cabezal del reactor, cuyo diseño se basa en la forma de un intercambiador tipo AET, y reaccionarán a lo largo de los tubos donde se encuentran en contacto íntimo con el catalizador.

Por la carcasa fluirá el agua a alta presión, absorbiendo el calor transmitido por la reacción principal, que es exotérmica, manteniendo así la temperatura de los tubos constante.

A continuación se muestra una figura explicativa de este tipo reactores:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

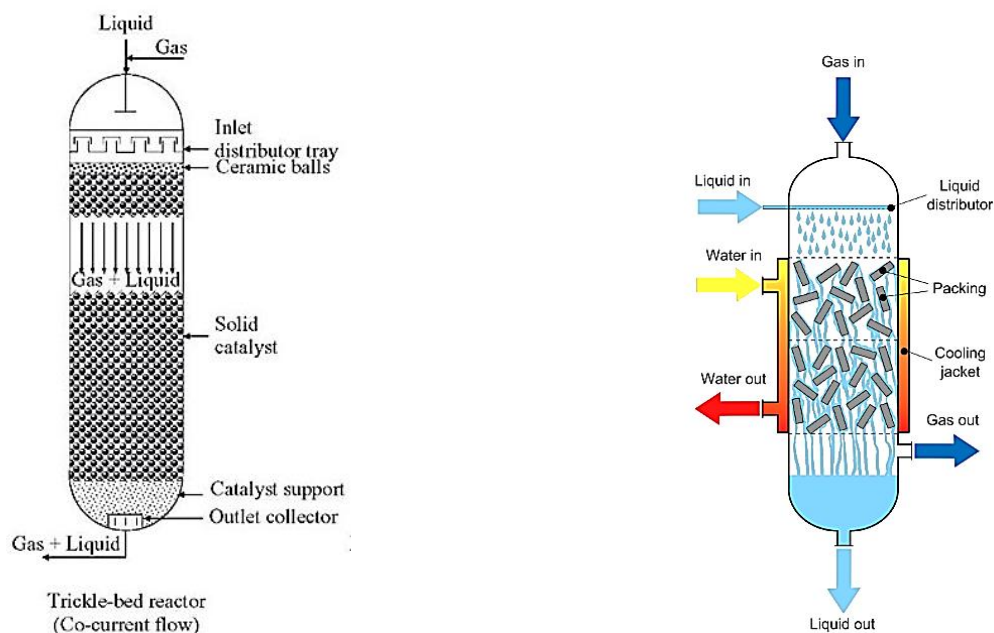


Figura 13.-Esquemas genéricos de reactores trickle-bed

7.6.1.-Diseño de los elementos constitutivos de los reactores

En este apartado vamos a detallar los elementos más significativos de los reactores que se han diseñado. Dado que los dos reactores son idénticos nos hemos centrado en el diseño de uno solo, siendo todo esto aplicable al segundo.

La elección de todos estos elementos y sus características son consecuencia de un extenso proceso de cálculo que se explica en profundidad en el **Anexo 1 de la Memoria**.

7.6.1.1.-Tubos

Los tubos empleados están contruidos en acero inoxidable TP347L. Tienen un diámetro de 3,94 in una longitud de 5,07 m y un espesor de 0,105 in (BWG 12). Para el diseño de los mismos se ha respetado el código ASME B31.1 (2004).

Estos tubos se colocan en disposición de tresbolillo, lo cual está justificado por la gran cantidad de calor a intercambiar y el valor del caudal másico que circula por ellos.

Cada reactor tiene un total de 774 tubos, con un pitch de 1,25 in, donde sólo tiene lugar un paso por tubos.

7.6.1.2.-Carcasa

Para determinar el valor del diámetro interno de la carcasa es necesario conocer en primer lugar el valor de diámetro exterior del haz de tubos, el cual depende a su vez del diámetro exterior de los tubos, su número, su pitch y la disposición de los mismos en el interior de la carcasa.

La carcasa diseñada teniendo en cuenta todo lo anterior será construida en acero al carbono SA-285 y tiene un diámetro interno de 159,44 in.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.6.1.3.-Deflectores o Baffles

La carcasa que se ha diseñado está provista de 3 placas deflectoras que tienen la misión de orientar el fluido en la dirección perpendicular al eje de los tubos, favoreciendo así el intercambio de calor.

Los deflectores seleccionados son de tipo segmentado, con forma circular y tienen un corte bien horizontal o bien vertical. Van montados dentro de la carcasa, de manera que en placas consecutivas los cortes se encuentran girados un ángulo de 180º, y el espaciamiento entre ellas tiene un valor de 1,27 m.

Resulta obvio que dichas placas deben poseer perforaciones para permitir así que los tubos que se hallan dentro del reactor puedan atravesarlas.

7.6.1.4.-Cabezal de distribución

Este elemento constitutivo del sistema de reacción es el encargado de recibir el fluido que va a circular por el interior de los tubos, con el fin de recolectarlo y distribuirlo de forma uniforme. Para este cometido hemos seleccionado un cabezal de tipo A, es decir, de canal y de cubierta desmontable (Consultar tabla de tipos de intercambiadores en el Capítulo 10 de la Memoria).

7.6.1.5.-Cabezal de retorno

Este cabezal es el encargado de recolectar el fluido que circula por el interior de los tubos y los dirige hacia el exterior. Para esta misión hemos seleccionado un cabezal flotante interno debido a su facilidad de mantenimiento, inspección y reparación; siendo uno de los más habituales en este tipo de reactores.

7.6.1.6.-Pitch

El pitch se entiende como la distancia existente entre los centros de los tubos, es decir, cuanto distan los tubos de centro a centro una vez dispuestos en el reactor.

En nuestro diseño hemos seleccionado un valor de 1,25 in.

7.6.1.7.-Envolvente

La envolvente de los reactores diseñados será de tipo E, esto es consecuencia de que el flujo sea de un solo paso por el lado de la carcasa, de acuerdo al criterio que hemos seguido para la selección del tipo de reactor.

7.6.2.-Aislamiento de los reactores

Debido al hecho de que el agua que circula por el lado de la carcasa alcanza una alta temperatura al absorber el calor generado por la reacción, es necesario llevar a cabo el

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

aislamiento del reactor para evitar en la medida de lo posible las pérdidas de calor al exterior, así como por cuestiones de seguridad de los operarios en la planta.

El material seleccionado para cumplir este cometido es la lana de roca, por ser el más económico y cubrir las necesidades técnicas del equipo.

7.6.3.-Datos de diseño de los reactores

En este apartado vamos a incluir una tabla resumen que recoge todos los datos que definen a nuestros sistemas de reacción y cuyo desarrollo de cálculo tiene lugar en el **Anexo 1**, como ya hemos comentado en repetidas ocasiones.

Reactores HDS	
Descripción	Reactor tubular
Denominación según TEMA	Carcasa y tubos AET
Posición	Vertical
Tubos	
Material	Acero inoxidable AISI TP347L
Diámetro externo [m]	0,1
Espesor comercial	12 BWG
Longitud [m]	5,076
Disposición	tresbolillo
Pitch [in]	1,25
Número de tubos	774
Número de pasos	1
Área de transferencia[m ²]	129,7
Carcasa	
Material	Acero al carbono SA-285
Diámetro interno [m]	4,05
Espesor comercial [mm]	25,4
Número de pasos	1
Deflectores	
Número	3
Espaciamento [m]	1,27
Espesor [m]	0,019
Tipo	Segmentado
Aislamiento	
Tipo	Lana de roca
Espesor [mm]	120

Tabla 18.-Resumen de diseño de los reactores

CAPÍTULO 8.-DISEÑO DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

8.1.-Introducción

En primer lugar, mencionar que todos los cálculos referentes al diseño de la columna de destilación se encuentran explicados en el **Anexo 3 de la Memoria**.

En este capítulo haremos una descripción general del proceso de destilación en el que nos basaremos para explicar el proceso de diseño de nuestro equipo en particular.

La destilación se entiende como el proceso de separación física de una mezcla de dos o más componentes que poseen diferente punto de ebullición, empleando gradientes de temperatura para conseguir tal fin.

Esta operación unitaria es la más empleada en plantas de proceso como método de separación aún a pesar de su baja eficiencia termodinámica. Si consideramos el proceso desde el punto de vista cinético y termodinámico, se encuentran en la bibliografía (Perry et al; 2001) las siguientes conclusiones:

- Desde el punto de vista cinético la destilación tiene potencial para altos flujos de transferencia de masa ya que solo está limitada por las resistencias difusionales, lo cual deriva en bajas del coste de capital.
- Desde el punto de vista termodinámico, debemos tener en cuenta que la eficiencia es de un 10%, aunque puede ser mejorada por la adición de condensadores y calderines. Aún siendo tan baja su eficiencia es mejor que la de otros procesos de separación.

Encontramos por regla general que la destilación es la operación unitaria de separación más recomendada en la mayoría procesos industriales, existiendo sólo algunos casos donde se recomienda el empleo de otras operaciones de separación. Esto suele darse cuando la diferencia de volatilidades es muy baja, se trabaja con compuestos inestables, y el empleo de mezclas sucias o corrosivas.

En el proceso de destilación se condensa una porción del vapor generado en la primera etapa, esto se hace con el objetivo de aumentar la eficacia del proceso, ya que un conjunto de destilaciones sucesivas del líquido, unido a una o varias condensaciones del vapor permiten mejorar de forma notable la eficacia de la separación. Este proceso se denomina como rectificación.

8.2.-Selección del tipo de columna

En este apartado nos disponemos a explicar los dos tipos principales de columnas que podemos diseñar y se justifica la elección de uno de ellos.

Por un lado tenemos las columnas de relleno, que proporcionan una baja pérdida de carga debido a que su área abierta es mayor que la de torres de platos. Además, se caracterizan por funcionar bien con mezclas corrosivas o espumantes, debido al amplio rango de materiales en los que se fabrican los rellenos, pudiendo contrarrestar los anteriores efectos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Sin embargo, el uso de columnas de relleno no está recomendado para diámetros mayores de 3 pies porque pueden surgir problemas con la distribución del fluido en el interior de la torre. Debido a esto no es aconsejable el empleo de este tipo de columnas en el presente Proyecto, pues tenemos un diámetro mayor en nuestra torre, además los componentes a separar no presentan problemas de corrosión ni formación de espumas que nos empujen a trabajar con este tipo de equipos.

Por otro lado tenemos las típicas columnas de rectificación de platos, las cuales se caracterizan por funcionar bien con altos caudales de líquido y abarcando rangos de operación más amplios que los equipos de relleno. Son dispositivos más sencillos de mantener y limpiar, y pueden disponer de bocas de hombre para facilitar el acceso. Son también equipos adecuados para trabajar con valores bajos de relación líquido-vapor.

Basándonos en todo lo citado anteriormente, para este Proyecto Fin de Carrera se ha seleccionado el diseño de una torre de platos perforados como equipo de separación.

8.2.1.-Descripción general del funcionamiento de la torre

A nuestra torre de destilación entra una corriente de alimentación (F), con una composición en el componente más volátil (X_F), y se obtiene por cabeza de columna una corriente de destilado (D), con una composición en el componente más volátil (X_D), y por cola de columna una corriente de residuo (W), con una composición en el componente más volátil (X_W).

En la parte superior de la columna existe un condensador que toma el vapor procedente de la salida de cabezas y lo condensa, devolviéndose una fracción del condensado a columna como reflujo.

En el interior de la columna se producen corrientes ascendentes de vapor y descendentes de líquido que están en contacto íntimo, favoreciendo así la transferencia de materia. El líquido desciende por acción de la fuerza de la gravedad, mientras que el vapor asciende debido a la diferencia de presión existente entre plato y plato, esta diferencia de presión se genera en el calderín que se encarga de vaporizar parte de la salida de la corriente de colas. El vapor formado atraviesa un conjunto de aperturas en cada uno de los platos de la columna (platos perforados) y entran en contacto con el líquido, que circula a contracorriente, produciéndose durante todo este proceso la transferencia de materia correspondiente.

8.3.-Reglamentos y códigos de diseño aplicados

Para el diseño de la columna vamos a seguir el código ASME (American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessels Code), en particular la Sección VIII División 1, en la que se establecen normas mínimas de construcción relativas a recipientes a presión.

El diseño mecánico de la columna, también se rige por el Reglamento de Aparatos a Presión y su ITC (Instrucción Técnica Complementaria) MIE-AP6, relativa a refinerías de petróleo y plantas petroquímicas. Además, esta ITC establece que los aparatos incluidos en su

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

campo de aplicación deben cumplir además las especificaciones que se indican en el Reglamento de Instalaciones Petrolíferas y su ITC MI-IP 01 “Refinerías”.

8.4.-Método de resolución de la columna de destilación

Para la realización del diseño de la columna se ha hecho uso un programa informático de simulación llamado Aspen HYSYS V8.4. Este simulador es la herramienta de modelado líder en el mercado para el diseño conceptual, la optimización, planificación empresarial, gestión de activos y la supervisión del rendimiento. Éste facilita la labor de los ingenieros aportando resultados rápidos, optimizados y rigurosos.

Las principales características que presenta este programa son:

- Fácil de usar y fácil de entrenar. La naturaleza interactiva e intuitiva de HYSYS permite a los usuarios crear y utilizar sus modelos de manera rápida y eficaz.

- Mejor método en su clase para el cálculo de las propiedades físicas. Aspen HYSYS ofrece una base termodinámica completa para el cálculo preciso de las propiedades físicas, propiedades de transporte, y el comportamiento de las fases para el petróleo y las industrias petroquímicas.

- Amplia biblioteca de modelos de funcionamiento de unidades, incluida la destilación, reactores, las operaciones de transferencia de calor, equipos rotativos, los controladores y las operaciones lógicas, tanto en el estado de equilibrio como en entornos dinámicos.

En el **apartado 3.2.6 del Anexo 3 de la Memoria** se explica en detalle el procedimiento que hemos seguido para diseñar la torre haciendo uso del simulador, se exponen también diferentes imágenes de las ventanas del programa para que sea más sencillo el seguimiento de esta explicación. Se recogen también en este apartado los resultados obtenidos tras la simulación, que han sido empleados para el diseño de la torre.

De un modo más simple, podemos decir que esta herramienta de modelado desarrolla la respuesta que produce una determinada corriente de flujo al pasar por la columna con unas determinadas especificaciones fijadas. Algunas de dichas especificaciones vienen fijadas por las propias necesidades del Proyecto, mientras que otras deben calcularse o aproximarse mediante métodos de estudio manuales.

En nuestro caso particular, el método que hemos empleado para la determinación de estas especificaciones es el método FUG para diseño de columnas de destilación de mezclas multicomponentes. Al no existir salidas laterales, ni otro tipo de modificaciones en nuestra columna no debemos realizar modificaciones en las ecuaciones del método FUG. A continuación se describe brevemente este método.

8.4.1.-Método FUG

El método FUG (Fenske-Underwood-Gilliland) es el más utilizado para el diseño de columnas de destilación multicomponente. Se trata de un método aproximado basado en una secuencia de cálculo propuesta por los autores Fenske, Underwood y Gilliland para la

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

obtención del número de platos teóricos mínimos, la relación de reflujo mínima y el número de platos teóricos respectivamente.

La elección de este método se justifica por el hecho de que nuestra alimentación es una mezcla de cuatro componentes y por el hecho de que no tenemos datos de reflujo de partida.

En el presente diseño de la columna de destilación se ha introducido además el concepto de eficacia o rendimiento global. Como sabemos, en un plato real no llega a alcanzarse el equilibrio entre el líquido y el vapor, de manera que la composición del vapor que sale del plato es menor que la del equilibrio y la del líquido mayor. Por tanto, el número de platos ideales obtenido por el método de cálculo empleado debe ser corregido por la eficacia, conociéndose así el número de platos reales necesarios.

Una vez obtenidas todas las especificaciones necesarias, se introducen en el programa para realizar la correspondiente simulación, que convergerá en caso de que todos los pasos de cálculo anteriores se hayan realizado correctamente.

La aplicación de este método para nuestro diseño en particular se encuentra desarrollado en el **Anexo 3 de la Memoria**, más concretamente a partir del apartado 3.2.4. Consúltese dicha sección si se desea profundizar en este tema.

Finalmente, se comparan los datos obtenidos con el simulador con los que se han obtenido aplicando el método manual, y se representan los datos definitivos, desarrollados por el simulador. A partir de este momento todo lo relativo al diseño de la columna se basará en estos datos, ya que el simulador ofrece una respuesta más precisa que cualquier otro método aproximado que podamos emplear.

8.4.2-Condiciones de operación

Antes de entrar en el estudio de la columna se fijan una serie de aspectos básicos de cara al diseño de la misma:

— Las corrientes de entrada y salida de cada plato están en equilibrio (funcionamiento ideal de la columna).

— Se supone que la columna trabaja en continuo, de modo que los caudales de entrada y salida de la columna permanecen constantes.

8.4.2.1-Presión y temperatura

La presión absoluta promedia de la columna es de 1426 KPa, siendo así la presión de diseño calculada para nuestra columna de 227,5 psi.

La temperatura de operación, por su parte, tiene un valor promedio de unos 130 °C a lo largo de la columna, determinándose una temperatura de diseño de 200 °C.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Si se desea estudiar con más detalle los términos de presión y temperatura de la presente columna de destilación pueden consultarse los **apartados 3.2.6.3.1 y 3.2.7.2.1 del Anexo 3 de la Memoria**.

8.4.2.2.-Condición de alimentación

Como la alimentación entra en la columna a su temperatura de ebullición, podemos decir que la condición de alimentación, ϕ , tendrá un valor de $\phi=1$. (Ver **apartado 3.2.3 del Anexo 3 de la Memoria**).

8.4.2.3.-Condición de reflujo

En la siguiente tabla se exponen los valores del reflujo interno y del reflujo externo:

R_{\min}	0,011
$(L/V)_{\min}$	0,0109
(L/V)	0,0167
R_D	0,017

Tabla 19.-Relaciones de reflujo en la columna

Se recomienda consultar los apartados 3.2.4.3 y 3.2.6.1 (Fig.14) del **Anexo 3** de la Memoria.

8.4.3.-Balances de materia

El balance de materia definitivo proviene del programa de simulación HYSYS, no obstante se han realizado cálculos previos durante el desarrollo el método FUG (ver **apartado 3.2.2 del Anexo 3 de la Memoria**). Se presenta en la siguiente tabla los balances de materia definitivos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Summary		
Feeds		
Flow Rate (kgmole/h)	439,2000	Composition
n-Butane(kgmole/h)	258,6044	0,5888
E-Benzene(kgmole/h)	15,9254	0,0363
BiPhenyl(kgmole/h)	21,6410	0,0493
n-C16(kgmole/h)	143,0293	0,3257
Products		
Butano(GLP)		
Flow Rate (kgmole/h)	233,9727	Composition
n-Butane(kgmole/h)	232,6983	0,9946
E-Benzene(kgmole/h)	1,0535	0,0045
BiPhenyl(kgmole/h)	0,1124	0,0005
n-C16(kgmole/h)	0,1086	0,0005
Producto(FCC)		
Flow Rate (kgmole/h)	205,2273	Composition
n-Butane(kgmole/h)	25,9209	0,1262
E-Benzene(kgmole/h)	14,8713	0,0725
BiPhenyl(kgmole/h)	21,5276	0,1049
n-C16(kgmole/h)	142,9146	0,6964

Tabla 20.-Balance de materia ejecutado en HYSYS

8.4.4.-Número de platos y situación del plato de alimentación

Echando un vistazo al **apartado 3.2.5 del Anexo 3 de la Memoria** podemos comprobar que el número de platos determinado por los métodos manuales, teniendo en cuenta el concepto de eficacia, coincide con el número de platos calculado con el uso del simulador HYSYS.

De este modo concluimos que la torre diseñada consta de 30 platos, entrando la alimentación en el plato 12. De este modo la zona de rectificación cuenta con 12 platos, mientras que la zona de agotamiento cuenta con 18 platos (ver **apartado 3.2.6.3.2 del Anexo 3 de la Memoria**).

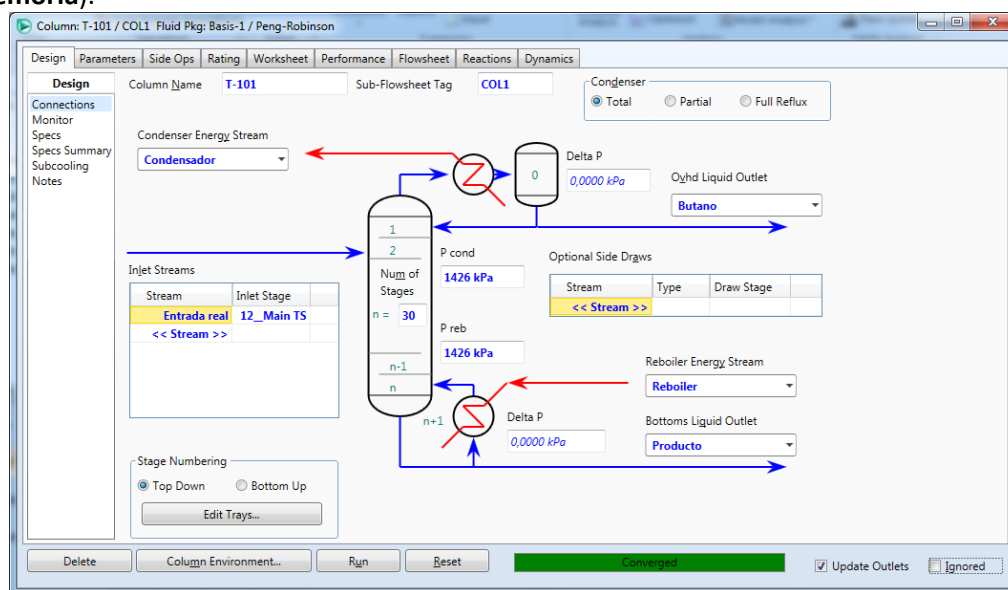


Figura 14.-Esquema de la columna desarrollado en HYSYS

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Según esto, y teniendo en cuenta el equilibrio adicional que aporta el rehervidor, resulta un total de 31 etapas de equilibrio en el conjunto de la torre.

8.5.-Diseño hidráulico

En este apartado se justifica la elección de los aspectos generales del diseño hidráulico de la columna de destilación, desde el punto de vista cualitativo. Los aspectos cuantitativos se recogen en el **Anexo 3 de la Memoria** y los resultados de cálculo se han tomado directamente del simulador, para evitar alargar este Proyecto Fin de Carrera más de lo necesario.

8.5.1.-Tipos de platos

Una de las primeras y más importantes decisiones en el diseño hidráulico de una columna de destilación es la elección del tipo de plato a emplear. Entre los platos más empleados se encuentran los platos perforados, los platos de válvula y los de campana de borboteo. Vamos a hablar un poco más de cada uno de ellos:

— Los platos perforados se caracterizan por su bajo coste, su versatilidad y su disponibilidad en el mercado.

— Los platos de válvula se presentan en diferentes formas, pero todas tienen en común la ventaja de presentar un bajo bloqueo por vapor. Su principal inconveniente es que son entre un 5 y un 10% más caros que los platos perforados.

— Los platos de campana de borboteo están especialmente indicados para aquellos casos en los que se necesite un bajo bloqueo por vapor, el cual no pueda cubrir un plato de válvulas. Lógicamente el coste de estos platos es el mayor de los tres citados.

Existen también otros tipos de platos menos usados, los cuales están generalmente destinados a solventar otros tipos de problemas hidrodinámicos de las columnas menos frecuentes, como los platos de ranura, los platos de chorro, etc.

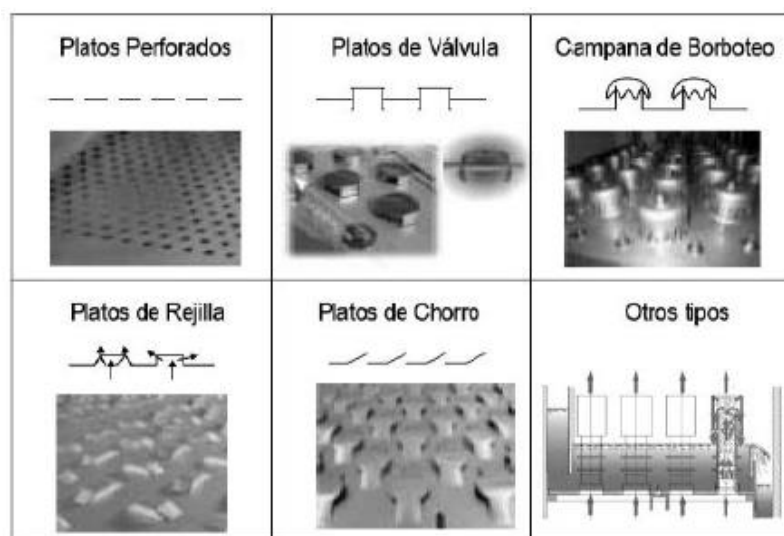


Figura 15.-Esquema de los distintos tipos de platos

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Para nuestro diseño en particular se han seleccionado platos perforados debido al hecho de que nuestra columna no presenta graves problemas hidrodinámicos, lo cual nos ha llevado a seleccionar la opción más cómoda y rentable. Posteriormente se comprueba mediante uso del simulador que los resultados obtenidos empleando este tipo de platos son completamente satisfactorios.

Este tipo de plato ha sido empleado tanto para la zona de rectificación como para la zona de agotamiento.

8.5.2.-Otros aspectos generales

Existen otra serie de aspectos generales a la hora de realizar en diseño hidráulico de una columna de destilación, como son: el diámetro de la torre, el espaciamento entre platos, la altura del rebosadero, etc.

Para no extender excesivamente el Proyecto Fin de Carrera esta información se ha tomado directamente de la suministrada por el simulador.

Una vez seleccionado el tipo de plato y habiendo introducido todos los parámetros de diseño que se desarrollaron en el apartado 8.4 de este capítulo, el simulador nos devuelve todo lo relativo al diseño hidráulico de la columna. Así, en este apartado se incluye una tabla con el resumen final del diseño, pero se recomienda la lectura del **Anexo 3 de la Memoria** a partir del apartado 3.2.6.3.3 si se quieren conocer más detalles acerca de este tema.

Performance Results		
	Section 1	Section 2
Internals	Sieve	Sieve
Number of Flow Paths	1	1
Jet Flooding Method	Glitsch	Glitsch
Column Geometry		
Section Diameter [m]	1,067	1,219
X-Sectional Area [m ²]	0,894	1,167
Hole Area [m ²]	4,64E-02	6,20E-02
Active Area [m ²]	0,4601	0,6150
DC Area [m ²]	0,2169	0,2762
Tray Spacing [m]	0,6096	0,6096
Section Height [m]	7,315	10,973
Hydraulic Results		
Max Flooding [%]	70,11	55,45
Max DC Backup [%]	41,60	36,51
Max DP/Tray [kPa]	0,512	0,442
Section DeltaP [kPa]	4,287	7,887
Max Weir Load [m ³ /h-m]	86,65	76,22

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tray Details		
Total Weir Length [mm]	969,8	1102,4
Weir Height [mm]	50,8	50,8
DC Clearance [mm]	38,1	38,1
Side Weir Length [m]	0,9698	1,1024
Estimated # of Holes/Valves	1464	1956
Side DC Top Width [mm]	311,2	349,3
Side DC Btm Width [mm]	311,2	349,3
Side DC Top Length [m]	0,9698	1,1024
Side DC Btm Length [m]	0,9698	1,1024
Side DC Top Area [m ²]	0,2169	0,2762
Side DC Btm Area [m ²]	0,2169	0,2762
Flow Length [mm]	444,5	520,7
Flow Width [mm]	1035	1181

Tabla 21.-Resumen de diseño de la columna desarrollado en HYSYS

8.6.-Diseño mecánico

Se expone en este apartado la información necesaria relativa al diseño de la columna para recoger finamente los resultados obtenidos en una tabla resumen. Para ver el desarrollo de cálculos necesarios puede consultarse el **apartado 3.2.7 del Anexo 3 de la Memoria**.

8.6.1.-Reglamentación y códigos de construcción

El código de diseño y construcción seguido en el diseño de la columna de destilación ha sido el Código ASME, Sección VIII División 1. En él se establecen los requerimientos mínimos para el diseño, fabricación en inspección, así como para obtener la certificación autorizada de ASME para los recipientes a presión.

Excluye, de forma específica, los recipientes que presentan una presión interna que no supera el valor de 15 psi y establece que las reglas se aplican para presiones que no sean superiores a los 3000 psi, intervalo en el que se encuentra la columna que se diseña en el presente Proyecto Fin de Carrera.

8.6.2.-Material de la columna

Tanto para la envolvente como para los platos que conforman la columna, se selecciona el acero al carbono SA 285 Gr C. Se trata de uno de los aceros más usados en la industria y, a la vez, uno de los más económicos dentro de los que cumplen los requisitos para ser aplicados en nuestro diseño.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

8.6.3.-Carcasa cilíndrica

Se realiza el cálculo del espesor de la envolvente según el procedimiento recomendado en el código ASME Sección VIII División 1, para recipientes a presión interna. Además, vamos a tener en cuenta la presión ejercida por el viento debido a que el recipiente a diseñar es vertical y de altura considerable.

8.6.4.-Fondos

Los cabezales de las columnas son tori esféricos, por ser los de mayor empleo en la industria, así como tener un bajo coste. Existen dos clases de fondos tori esféricos que son: Kloppe y Korbboogen.

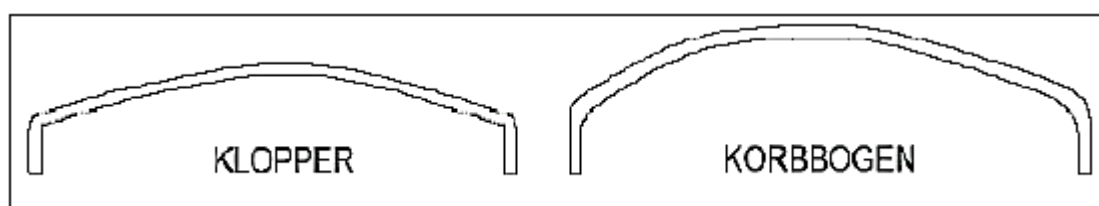


Figura 16.-Tipos de fondos tori esféricos

Por lo general se emplean los fondos tipo Kloppe, excepto que se dé alguna de las siguientes condiciones, en cuyo caso se emplearán fondos de tipo Korbboogen:

- Presión de diseño igual o superior a 7 kg/cm^2
- Temperatura de diseño superior a los $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Recipientes verticales cuya relación altura/diámetro sea superior a 10. Aplicable sólo al fondo inferior.

En nuestro caso particular se empleará fondo Korbboogen en los dos casos (ver apartado 3.2.7.2.3 del Anexo 3 de la Memoria).

Mediante el código ASME se realizará también el cálculo del espesor y de las dimensiones características. Según esto, para cada zona de la columna se requiere un espesor determinado; con el objetivo de simplificar el proceso de diseño se ha optado por el emplear el mayor de los espesores requeridos para el conjunto de la torre. Esta opción es la más acertada desde el punto de vista económico, teniendo en cuenta las pequeñas diferencias de espesores existentes entre las diferentes zonas.

Por lo anteriormente expuesto, se decide construir la columna de destilación con un espesor constante y superior al máximo necesario.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

8.6.5.-Faldilla

Para realizar las uniones entre los fondos y la carcasa se añade una placa cilíndrica, denominada faldilla, por la cual se realizará la soldadura. La función de esta pestaña es evitar que dicha soldadura se realice por la línea de tangencia, ya que ésta se encuentra sometida a grandes tensiones axiales que se traducen en fuertes tensiones locales y, por tanto, resulta ser el punto más débil de toda la columna.

El espesor de la faldilla coincide por tanto con el del fondo de la columna y tiene un diámetro idéntico al de la envolvente o cuerpo principal (ver **apartado 3.2.7.3 del Anexo 3 de la Memoria**).

8.6.6.-Soporte del recipiente

Los dispositivos de apoyo para recipientes verticales pueden ser de varios tipos: patas, ménsulas o faldones.

La columna descrita en este Proyecto está sustentada por faldones, ya que cumple alguna de las siguientes condiciones:

- El diámetro de la envolvente es superior a 1,5 m.
- La relación altura/diámetro del recipiente es mayor que 5
- Se esperan vibraciones
- El peso del recipiente lleno de agua es superior a 15000 kg

Este faldón va soldado al fondo inferior de forma que los diámetros medios del faldón y la envolvente coinciden. Se dispone de una abertura de acceso circular de 20 in de diámetro, situada en el lado opuesto a la abertura de los tubos (ver **apartado 3.2.7.5 del Anexo 3 de la Memoria**).

La abertura para la tubería del fondo, la cual lleva un codo de 90º y una prolongación hacia el exterior, es de tipo circular y su diámetro es de una pulgada superior al de la propia tubería que pasa a través de ella. A su vez, el faldón está provisto de ventilación, pues cuenta con dos agujeros de dos pulgadas de diámetro a la altura de los fondos, encontrándose estos agujeros en lados opuestos.

En relación al material del faldón, mencionar que estará construido en acero al carbono, lo cual es posible siempre y cuando se suelde a placas externas del mismo material del cuerpo soldadas previamente. Será seleccionado en nuestro caso el acero al carbono SA-283 C, por ser uno de los aceros más económicos que se consideran como apropiados para recipientes y sustentaciones, además de ajustarse a nuestros requisitos particulares.

Finalmente, indicar que el faldón cuenta con protección ignífuga, consistiendo ésta en una capa de hormigón de cinco centímetros de espesor.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

8.6.7.-Aislamiento

Respecto del aislamiento empleado en la columna indicar que se ha seleccionado lana de roca por ser un material económico y cubrir las necesidades de nuestra columna.

8.6.8.-Accesorios externos

Nuestra columna dispondrá de los accesorios externos básicos como son:

— Bocas de hombre: se instalarán bocas de hombre de 24 in de diámetro encima del plato superior y otra debajo del plato de alimentación, además de en aquellas alturas necesarias para que la distancia entre bocas de hombre no sea superior a los seis metros.

— Escaleras y plataformas: la columna dispone de una escalera, junto a ella se encuentran varias plataformas de descanso desplazadas horizontalmente y situadas a la altura de las bocas de hombre. Estas plataformas han de disponer de sus correspondientes barreras de seguridad.

— Pescantes: si el recipiente contiene elementos pesados en su interior será necesario instalar un pescante en la parte superior del equipo para facilitar la instalación y la retirada de dichos elementos. La columna que hemos diseñado contiene platos perforados en su interior, de modo que lleva instalado un pescante con una capacidad superior a los 500 kg.

— Conexiones. La columna presenta una gran cantidad de conexiones con las tuberías que conducen los fluidos que entran y salen de la misma, el diámetro de cada una de estas conexiones dependerá de la tubería que conecta con ella(consultar el **Anexo 6**, dedicado al diseño de tuberías).

— Válvulas de seguridad: se dispone de una válvula de seguridad para prevenir que las presiones en el equipo alcancen niveles que puedan producir roturas o fallos mecánicos. En caso de sobrepresión se descarga el exceso de líquido y vapor hasta que la presión en el equipo caiga de nuevo dentro de los límites normales de funcionamiento. Cada válvula de seguridad se caracteriza por ser de apertura total y sistema de resorte.

8.7.- Tabla de los datos mecánicos

En la siguiente tabla se recogen a modo de resumen los datos obtenidos tras el proceso de cálculo del diseño mecánico de la columna, como ya se indicó en el apartado 8.6 del presente capítulo (ver **apartado 3.2.6.4 del Anexo 3 de la Memoria**).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Carcasa cilíndrica		
	Sección 1	Sección 2
Espesor[mm]	17,5	17,5
Altura[m]	7,315	10,973
Diámetro[m]	1,067	1,219
Fondos		
Tipo	Korbbogen	Korbbogen
Altura[m]	0,277	0,317
Radia mayor[m]	0,854	0,975
Radio menor[m]	0,164	0,188
Faldilla[mm]	52,5	52,5
Altura total sin faldón[m]	18,987	
Faldón		
Altura[m]	1,5	
Altura total[m]	20,487	
Aislamiento		
Espesor[mm]	80	

Tabla 22.-Resumen de diseño mecánico de la columna

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 9.-DISEÑO DEL ACUMULADOR DE REFLUJO

9.1.-Introducción

Un acumulador de reflujo es la unidad encargada de almacenar el líquido condensado procedente de los aerorefrigerantes. Su función es retenerlo en su interior un tiempo determinado con el fin de asegurar que ninguna fracción del mismo retorne a estado vapor y evitar así que se produzca la cavitación de las bombas posteriores de reflujo y destilado al aspirar dicho fluido.

Estos tanques pueden ser cilíndricos horizontales o cilíndricos verticales de fondo plano:

- ✓ Los líquidos en cantidades inferiores a 1000 gal ($3,8 \text{ m}^3$) son almacenados en tanques verticales montados sobre patas.
- ✓ Los líquidos en cantidades comprendidas entre los 1000 y 10000 gal ($3,8 \text{ m}^3$ y 38 m^3) son almacenados en tanques horizontales sustentados por una cimentación de hormigón.
- ✓ Los líquidos en cantidades superiores a 10000 gal (38 m^3) son almacenados en tanques verticales sustentados por una cimentación de hormigón.

Los tanques cilíndricos verticales de fondo plano permiten almacenar grandes cantidades volumétricas con un costo bajo, con la limitación de que sólo se pueden usar a presión atmosférica o presiones internas relativamente pequeñas según la normativa API- 650 y API-620. Por lo tanto, ya que el acumulador funciona a presiones cercanas a los 2 bares no se podrá utilizar este tipo de tanque.

Por otro lado, hay que tener en cuenta las siguientes reglas heurísticas (Branan, 2002):

— Los recipientes con capacidad inferior a 500 gal ($1,9 \text{ m}^3$) nunca se llenan por encima del 85 %.

— Los recipientes con capacidad superior a 500 gal ($1,9 \text{ m}^3$) nunca se llenan por encima del 90 %.

En conclusión, el acumulador de reflujo diseñado en el presente proyecto necesita una capacidad de $7,19 \text{ m}^3$, y que como no se llena por encima del 90%, se habla de 8 m^3 . Además, como la presión es de 14,26 bar, se decide diseñar un tanque horizontal soportado sobre cemento.

9.2.-Reglamentos y códigos de construcción

Las reglas y normativas que regulan el diseño de los acumuladores de reflujo dependen entre otras cosas de la presión a la que se encuentra sujeto el acumulador. Por lo tanto, en este caso son las mismas que las empleadas en la columna de destilación ya que, a efecto de clasificación, ambos tipos de equipos son considerados como equivalentes y trabajan en unas condiciones muy similares.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por ello los códigos y reglamentos aplicables son:

- Reglamento de Aparatos a Presión y su ITC MIE-AP6 relativa a refinerías de petróleo y plantas petroquímicas.
- Reglamento de Instalaciones Petrolíferas y su ITC MI-IP 01 “Refinerías”.
- Código ASME, Sección VIII (Recipientes a Presión), División 1.

9.3.-Características generales

En este apartado vamos a hacer una breve descripción de las partes más significativas que constituyen el acumulador de reflujo a diseñar. En el **Anexo 5**, se encuentra detallado todo el proceso de cálculo necesario, así como información adicional.

9.3.1.-Material

Para el botellón de reflujo vamos a seleccionar el mismo material que para la columna de destilación, y se justifica por los mismos motivos de aquél caso. Así pues, el material elegido es el acero SA-285 C.

9.3.2.-Cabezales

Los cabezales de los depósitos de reflujo son idénticos, siendo en nuestro caso ambos tipo Korbogen, lo cual se justifica en el **apartado 5.5 del Anexo 5**. Tanto el cálculo del espesor como de las dimensiones características de los cabezales se realizan atendiendo al código ASME.

9.3.3.-Soporte

El acumulador se soporta sobre unas silletas, del mismo material, que están sustentadas en una cimentación que confiere estabilidad y la altura apropiada al equipo.

9.3.4.-Aislamiento

Como en el resto de equipos diseñados hasta ahora el material seleccionado con la misión de aislar térmicamente este equipo es la lana de roca, por ser económica y cumplir los requisitos necesarios.

9.3.5.-Bocas de hombre

El código ASME establece que los acumuladores de reflujo con un diámetro superior a 36 in, deben tener una boca de hombre de entre 18 y 22 in de diámetro. Por lo tanto, este equipo tiene una abertura de inspección de 20 in.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

9.4.- Tabla de los datos mecánicos

En la siguiente tabla se recogen a modo de resumen los datos obtenidos tras el proceso de cálculo del diseño mecánico del acumulador de reflujo. El desarrollo de cálculo se recoge en el **Anexo 5 de la Memoria**.

Capacidad	
Tiempo de residencia [min]	15
Capacidad necesaria [m ³]	8
Carcasa cilíndrica	
Material	SA-283 C
Espesor [mm]	31,7
Díámetro interior [m]	2,59
Longitud [m]	1,37
Fondos	
Tipo	Korbbogen
Material	SA-283 C
Espesor [mm]	31,7
Longitud [m]	0,67
Radio mayor [m]	2,07
Radio menor [m]	0,39
Longitud total [m]	2,74
Volumen total [m ³]	11,71
Aislamiento	
Material	Lana de roca
Espesor [mm]	50

Tabla 23.-Datos de diseño del acumulador de reflujo

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 10.- DISEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

10.1.- Introducción

Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan la transferencia de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan, al mismo tiempo, que se mezclen entre sí.

Los equipos de transmisión de calor son una parte indispensable en cualquier proceso en la industria química. Su principal objetivo es acondicionar las corrientes para que todos los fluidos se encuentren en el estado y en las condiciones óptimas para que la eficacia de las operaciones sea máxima.

Todos los intercambiadores de calor que se van a diseñar en el presente Proyecto Fin de Carrera se clasifican en dos grupos principales: intercambiadores de carcasa y tubos, y aerorefrigerantes.

✓ Los intercambiadores de carcasa y tubos son los equipos de transmisión de calor de mayor difusión y uso en la industria petrolera y petroquímica, ya que son compactos y eficientes. En nuestro Proyecto podemos distinguir dos tipos de intercambiadores de carcasa y tubos, según la función que desempeñan.

Por un lado tenemos el calderín, cuya función es vaporizar parcialmente la corriente de fondo de la columna para luego recircularla a ésta. Y por otro lado, el denominado intercambiador líquido-líquido, cuya misión se centra en acondicionar térmicamente la alimentación de la columna para su entrada en el plato de alimentación en las condiciones adecuadas. Ambos equipos utilizan como medio de calentamiento aceite térmico Therminol 66 (ver Catálogos).

✓ Los aerorefrigerantes son intercambiadores de calor que emplean aire como fluido refrigerante y son ampliamente utilizados en la industria debido al hecho de que son muy económicos. Estos equipos prescinden de equipos auxiliares de bombeo, tuberías, colectores e incluso de líquido refrigerante, además de los gastos causados por la corrosión, congelación e incrustaciones que causan el uso de los mismos.

El aerorefrigerante diseñado en este Proyecto tiene como misión el condensar la corriente de vapor de cabeza de columna.

10.2.- Intercambiadores de calor en la industria

A continuación se realiza una clasificación de los intercambiadores de calor más empleados en la industria:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

10.2.1.-Intercambiadores de calor de doble tubo

Las partes principales son dos juegos de tubos concéntricos, dos conexiones en T, un cabezal de retorno y un codo en U. La tubería interior se soporta en la tubería exterior mediante estopas y el fluido entra en el tubo interior a través de una conexión roscada localizada en la parte externa del intercambiador. La tubería interior se conecta mediante una conexión en U que está generalmente expuesta y que no proporciona superficie de transferencia de calor.

La longitud efectiva es la longitud en cada rama sobre la que ocurre transferencia de calor y excluye la prolongación del tubo interior después de la sección de intercambio. Por tanto, estos intercambiadores se utilizan cuando se requiere un área de transferencia pequeño.

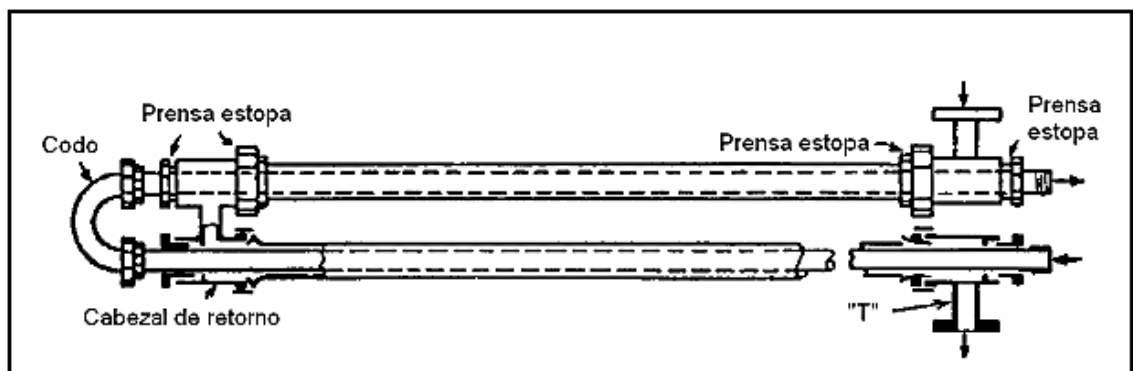


Figura 17.-Esquema intercambiador de doble tubo

Como ya hemos visto, estos intercambiadores están constituidos por dos tubos concéntricos, de modo que circula uno de los fluidos por el tubo interior y el otro por el espacio anular existente entre ambos tubos. Así los fluidos intercambian calor a través de la pared que separa ambos fluidos.

Este tipo de intercambiadores pueden funcionar en paralelo (los dos fluidos circulan en el mismo sentido) o a contracorriente (los fluidos circulan en sentidos opuestos).

Las ventajas de estos intercambiadores son las siguientes:

- Fáciles de desmontar.
- Operando en contracorriente se obtienen altos rendimientos.

Entre sus inconvenientes se encuentran:

- Riesgos de fugas en los empalmes.
- Flexión del tubo interior, si es demasiado largo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Superficie de transferencia pequeña en relación con el volumen global del aparato, como consecuencia del radio mínimo de los codos, que limita la aproximación de los tubos.

La presión máxima de trabajo es de 300 bares para el tubo exterior y 1.400 bares para el lado interior. El rango de temperatura oscila desde -100°C hasta 600°C.

10.2.2.-Intercambiadores de calor tipo placa

En estos intercambiadores de calor se sustituyen las superficies tubulares por superficies planas con ciertas rugosidades. Los intercambiadores de tipo de placa pueden presentarse en varias formas:

✓ Los intercambiadores de placa y armazón consisten en delgadas planchas corrugadas, empaquetadas o bien soldadas con cobre, que sirven como superficies de transferencia de calor y un armazón para su apoyo. Las placas son apretadas unas contra otras formando un paquete de placas dentro de un bastidor, en el que el flujo de producto se encuentra en canales alternos y el servicio entre los canales de producto. El área de intercambio necesaria se ajusta con facilidad mediante la adición o eliminación de placas.

✓ Los intercambiadores de aleta y placa soldada de aluminio se emplean en la industria para servicios por debajo de -45,6 °C. La superficie de transferencia de calor de aleta y de la placa se compone de una pila de placas, cada una de las cuales consiste en una aleta con estrías entre láminas metálicas planas, selladas en los dos lados mediante canales o barras, para formar un paso para el flujo de fluido.

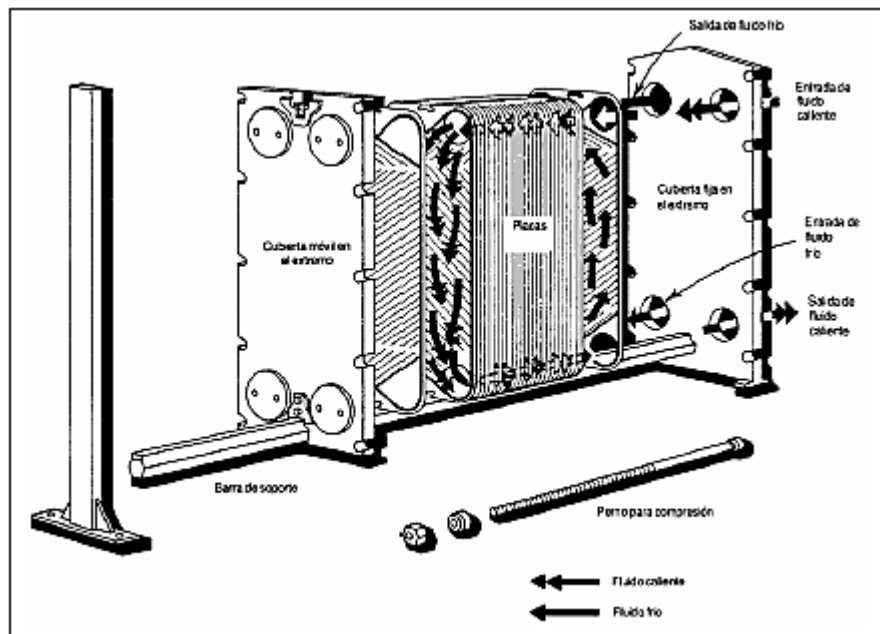


Figura 18.-Esquema intercambiador de placas

Dado que los más empleados son los de placa y armazón se describen a continuación algunas de sus ventajas:

— Tienen mayor tasa de transferencia de calor

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Producen menos ensuciamiento
- Son fáciles de limpiar
- Mantenimiento sencillo
- Ocupan menos espacio

Entre las desventajas encontramos:

- Los fluidos a emplear son limitados por la resistencia química de las placas y las juntas, así como por la temperatura de trabajo.
- El intervalo de presión en los conductos o aberturas de las placas limitan el caudal que fluye a través de ellas.
- Son caros si los comparamos con otros tipos de intercambiadores

El rango de presión idóneo para el funcionamiento de estos intercambiadores está comprendido entre los 25 y los 40 bares, mientras que las temperaturas pueden variar entre los -40 y los 200°C.

10.2.3.-Intercambiadores enfriados por aire

Consisten en una serie de tubos situados en una corriente de aire, que puede ser forzada con ayuda de un ventilador para mejorar la transferencia de calor. Los tubos suelen tener aletas para aumentar el área de transferencia de calor.

La selección de un intercambiador enfriado por aire frente a uno enfriado por agua es una cuestión económica o de requerimientos del proceso, hay que considerar gastos de enfriamiento del agua, potencia de los ventiladores y la temperatura de salida del fluido a refrigerar.

La presión máxima de trabajo es de 300 bares para el tubo exterior y 1400 bares para el lado interior. El rango de temperatura está comprendido entre -200°C y 600°C.

10.2.4.-Intercambiadores de calor de carcasa y tubos

Este tipo de intercambiadores están compuestos por una carcasa cilíndrica en cuyo interior se dispone un haz de tubos de pequeño diámetro, paralelamente al eje del cilindro, un fluido se hace circular por el interior de los tubos, mientras que el segundo fluido circula por el interior de la carcasa bañando los tubos del haz por su parte exterior. Estos intercambiadores de calor se usan para servicios en los que se requieren grandes superficies de intercambio, generalmente asociadas a caudales mucho mayores de los que puede manejar un intercambiador de doble tubo.

Estos intercambiadores son los más extendidos por diversas razones:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Presentan una gran facilidad de limpieza y mantenimiento.
- Tienen una gran superficie de transferencia.
- Son idóneos para intercambio de calor de productos de elevado caudal.
- Se pueden usar para prácticamente cualquier intercambio entre dos fluidos, incluyendo aquellos con cambio de fase.
- Se adaptan a flujos monofásicos y bifásicos, altas y bajas presiones, altas y bajas temperaturas, fluidos corrosivos o no.

La presión máxima de trabajo es de 300 bares para el lado de la carcasa y 1400 bar para el lado de los tubos. El rango de temperatura está entre -200°C y 600°C.

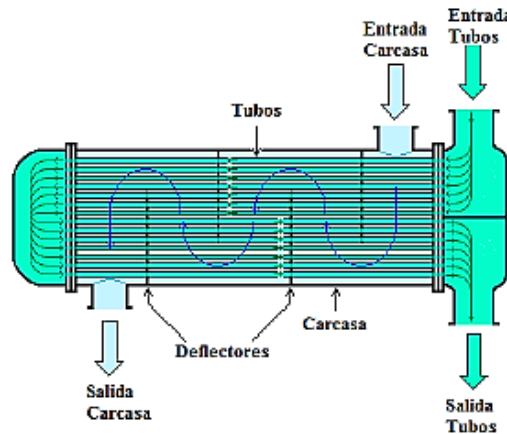


Figura 19.-Esquema intercambiador de carcasa y tubos

10.3.-Elección del tipo de intercambiador para cada servicio

Los principales factores que han de tenerse en cuenta en la elección de un tipo de intercambiador u otro, para un servicio concreto son los siguientes:

- Temperaturas de trabajo y estado de los fluidos
- Presiones de las corrientes y pérdidas de presión admisibles
- Caudales de los fluidos
- Posibilidades de ensuciamiento del aparato
- Acción corrosiva de los fluidos
- Espacio disponible para la instalación
- Factor económico

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Teniendo en cuenta lo anterior, para los servicios de acondicionamiento de la alimentación a la columna de destilación y para el rehervidor de colas se han seleccionado intercambiadores de calor de carcasa y tubos, por ser muy eficaces y ser los recomendados en la bibliografía en la mayor parte de los casos, además de ajustarse a nuestras necesidades de acuerdo a los requisitos que acabamos de exponer.

Con la misión de condensar la corriente de destilado hemos seleccionado un intercambiador enfriado por aire, también denominado aerorefrigerante, ya que se ajusta a los requerimientos del proceso y resulta más económico que emplear enfriamiento por agua.

10.4.-Intercambiadores de calor de carcasa y tubos diseñados

En este apartado vamos a describir el intercambiador de acondicionamiento de la alimentación a la columna de destilación (ICA) y el rehervidor de la corriente de colas o calderín (CV).

10.4.1.-Reglamentos y códigos de diseño

La construcción de estos equipos se encuadra dentro de la Sección VIII del Código ASME (American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessels Code), que establecen las normas generales para el diseño de recipientes a presión, más concretamente en la División 1. Para el diseño de los tubos el código remite a la norma ANSI B31.3.

Las normas TEMA (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association) especifican las características mecánicas y térmicas correspondientes a las diversas condiciones de funcionamiento. Esta norma sirve para complementar y definir el código ASME para todas las aplicaciones de intercambio de calor de tipo de coraza y tubos.

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos se pueden nombrar mediante tres letras, según TEMA:

— La primera letra indica el tipo de cabezal estacionario. Los tipos A (canal y cubierta desmontable) y B (casquete) que son los más empleados.

— La segunda letra se refiere a la carcasa. La carcasa tipo E, de un solo paso, es la más común. La carcasa F se utiliza normalmente cuando no es posible un único paso por carcasa debido a las diferencias de temperaturas entre el casco y los tubos. En cuanto a los intercambiadores G (tipo Split) su uso principal es la condensación de vapores. Los de tipo J (de fluido dividido) y H (doble Split) se usan para reducir las pérdidas de carga en la carcasa cuando ésta es variable. El intercambiador K (tipo Kettle) se utiliza cuando se requiere generar vapor. La carcasa X es del tipo flujo cruzado, en la cual se colocan una serie de boquillas de alimentación, y en posición contraria otras de salida.

— La tercera letra es indicativa del tipo de cabezal del extremo posterior. Las denominaciones S (cabezal flotante con dispositivo de apoyo), T (cabezal flotante sin contrabrida) y U (haz de tubo en U) son los más importantes.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

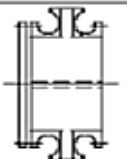
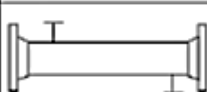
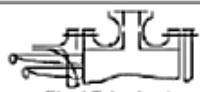
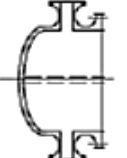
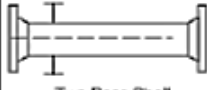

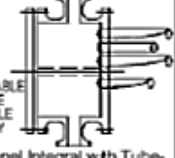
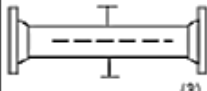
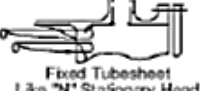
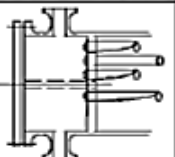
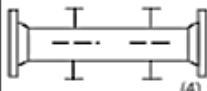
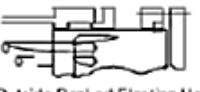
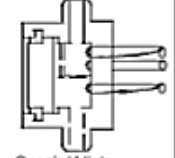


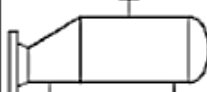




Front End Stationary Head Types (1)		Shell Types	Rear End Head Types (2)		
A	 Channel and Removable Cover	E	 One Pass Shell	L	 Fixed Tubesheet Like "A" Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two Pass Shell With Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tubesheet Like "B" Stationary Head
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	G	 Split Flow (3)	N	 Fixed Tubesheet Like "N" Stationary Head
N	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow (4)	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High Pressure Closure	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle Type Reboiler	T	 Pull Through Floating Head
		X	 Cross Flow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

Figura 20.-Configuración de los intercambiadores según la norma TEMA

10.4.2.-Descripción y funcionamiento

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos empleados en el presente Proyecto Fin de Carrera son dos: un intercambiador líquido-líquido (ICA) y un calderín (CV), como ya hemos mencionado en apartados anteriores.

A continuación explicaremos, de modo resumido, el funcionamiento de cada uno de ellos.

10.4.2.1.-Intercambiadores líquido-líquido

El equipo está constituido por un haz de tubos montados sobre dos placas tubulares y que llevan un número determinado de placas deflectoras. Por cada extremo se fijan las cajas de distribución que aseguran la circulación del fluido por el interior del haz, en varias fases.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El haz está alojado en una carcasa provista de una tobera de entrada superior y otra de salida inferior para el segundo fluido que circula por el exterior de los tubos, siguiendo el camino impuesto por las placas deflectoras.

El modelo de intercambiador más común que se ajusta a nuestras necesidades es uno de tipo AES (según la norma TEMA). Este tipo de intercambiador tiene casco de un paso, tubos de doble paso con canal y cubierta desmontable, cabezal flotante con dispositivo de apoyo. Cuenta, además, con desviadores transversales y placas de apoyo.

Las principales características de los intercambiadores tipo AES son:

- Permite la expansión térmica de los tubos respecto al casco.
- Permite el desmontaje.
- Posibilidad de tener 4,6 u 8 pasos por tubo.
- Los desviadores transversales, con el porcentaje de paso y su separación modifican la velocidad en el casco y su pérdida de carga.
- El flujo es a contracorriente y a favor de corriente en la mitad de los tubos.

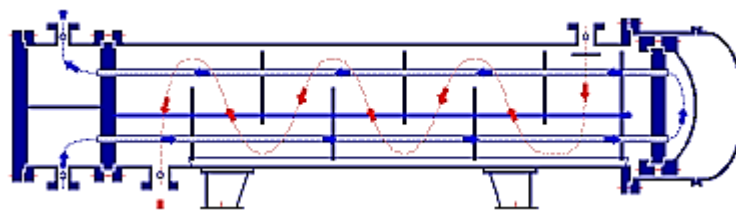


Figura 21.-Esquema intercambiador líquido- líquido (ICA)

10.4.2.2.-Calderín

El calderín es un intercambiador tipo Kettle, por ser el tipo de intercambiador recomendado en la bibliografía para tal fin, ya que proporcionan espacio para una alta carga de vapor. El equipo diseñado consta de una carcasa horizontal tipo K, según las normas TEMA, que contiene una bancada de tubos con forma de U sustentados a través de dos placas tubulares. En cada extremo hay una caja de distribución que permite la correcta repartición del fluido.

La alimentación se introduce en la masa de líquido por el fondo a través de una tobera, mientras que el vapor sale por la parte superior de la carcasa, la cual posee un espacio extra que permite la separación de éste. El líquido no vaporizado rebosa por el vertedero y es retirado por el fondo de la carcasa. Así, la carcasa consta de un total de tres toberas y se caracteriza por dos diámetros, el inferior, que comprende el volumen en el cuál se encuentran los tubos, y uno superior para favorecer la generación y el escape del vapor, sin problemas de sobrepresión.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

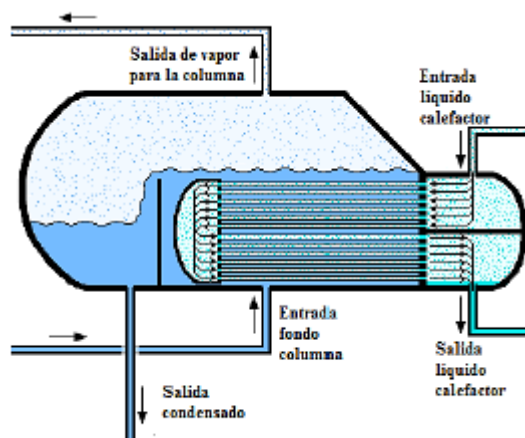


Figura 22.-Esquema del calderín (CV)

10.4.3.-Características generales de los intercambiadores

En este apartado vamos a exponer de forma breve las características principales de los dos intercambiadores de carcasa y tubos que hemos diseñado. Además se describirán los elementos constitutivos principales que son comunes a ambos intercambiadores. Para conocer los datos de los equipos diseñados véase el **Anexo 4 de la Memoria** donde se encuentra todo el proceso de diseño perfectamente detallado.

10.4.3.1.-Trayectoria de flujo

Antes de llevar a cabo el diseño de un intercambiador debemos designar qué fluido circulará por el interior de los tubos y cuál lo hará por la carcasa. Dicha decisión se toma en base a una serie de reglas (Perry et al; 2001):

- El fluido que tenga mayor presión circulará por los tubos
- El fluido más corrosivo circulará por los tubos
- El fluido más sucio debe circular por los tubos
- El líquido de mayor viscosidad o aquel que se encuentre en estado gaseoso debe circular por la carcasa
- El fluido que sufre menor pérdida de carga va por la carcasa

La trayectoria de los fluidos en cada intercambiador se especifica en el **Anexo 4**, correspondiente al diseño de los intercambiadores.

10.4.3.2.-Número de pasos de la carcasa y de los tubos

El número de pasos se refiere al número de veces que el fluido cambia de dirección al circular por el interior tanto de la carcasa como de los tubos. En el caso de la carcasa puede haber un solo paso o paso múltiple, mientras que en el caso de los tubos pueden tener 1, 2, 4 u 8 pasos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El diseño para el calderín es de paso 1-2 de flujo paralelo en contracorriente, donde el líquido de la carcasa fluye en un paso y el líquido del lado de los tubos lo hace en dos pasos ya que esta configuración disminuye la sección transversal libre para el fluido y aumenta su velocidad, dando lugar al correspondiente aumento del coeficiente de transmisión de calor. En el caso del intercambiador líquido-líquido hemos seleccionado una configuración 1-4.

Para comprobar si es correcta la elección de una configuración determinada hay que comprobar que la eficacia del equipo sea mayor al 80%. Si no es así, se aconseja elegir otro número de pasos por carcasa y tubos. En el **Anexo 4 de la Memoria** se comprueba esto para cada uno de los intercambiadores diseñados.

10.4.3.3.-Material

Para las tuberías con temperaturas de trabajo menores a 450 °C, el material adecuado es el acero al carbono SA-106 B. Debido al carácter no corrosivo de los productos, no es necesario el empleo de aceros aleados.

Como material de la carcasa se usa el acero SA-285 C, al tratarse de uno de los aceros más usados en los propósitos generales en la construcción de recipientes a presión que no requieren altos espesores y, a la vez, uno de los más económicos y apropiados para dicha aplicación.

10.4.3.4.-Carcasa

Como ya hemos mencionado en apartados anteriores se utiliza carcasa de un solo paso (E) para el intercambiador líquido-líquido y carcasa rehervidor de caldera (K) para el calderín.

En cuanto al diámetro de esta, se indica que para la carcasa tipo E solo existe un diámetro y para la tipo K se diseñan dos, el inferior y el superior. En estos casos el diámetro inferior depende del número estándar de tubos y es una medida normalizada, que depende de cada intercambiador. En el caso particular del calderín la carcasa superior es un 60 % mayor.

Respecto del espesor de la carcasa, deberá ser el adecuado para soportar las presiones internas a la que la carcasa se ve sometida. Además, las normas TEMA establecen un espesor mínimo para carcasas de diámetro superior a 12 in, con el fin de asegurarse de que puedan resistir otro tipo de cargas.

10.4.3.5.-Tubos

Los tubos diseñados para los intercambiadores de calor en el presente Proyecto Fin de Carrera son todos de sección circular.

La medida del tubo se identifica por el diámetro exterior y su espesor bajo la calibración BWG (Birmingham wire gage).

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, los pequeños diámetros proporcionan mayores coeficientes en un menor volumen, pero presentan el inconveniente de ser más difíciles de limpiar y producen una mayor pérdida de carga

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Los tubos se pueden disponer en una ordenación triangular o cuadrada. El arreglo triangular permite colocar alrededor de un 10 % de tubos más que en el arreglo cuadrado sobre una placa tubular del mismo diámetro.

10.4.3.6.-Deflectores

Son dispositivos que se colocan en el interior de la carcasa y tiene la misión de sostener los tubos, mantener el espacio entre estos y dirigir el flujo a través y a lo largo de la bancada de tubos de una forma específica.

Existen diferentes tipos de deflectores y estos pueden ser instalados de diferentes formas para proporcionar el patrón de flujo requerido para una aplicación dada. Encontramos así deflectores transversales y longitudinales.

Todos los intercambiadores de carcasa y tubos tienen deflectores transversales, excepto los de carcasa tipo X o K, como es el caso del calderín, que solo llevan platos de soporte.

El intercambiador líquido-líquido que se diseña (ICA) lleva consigo instalados deflectores transversales de tipo segmentado, los cuales dividen perpendicularmente al haz de tubos, teniendo como finalidad alargar el camino del fluido que circula por la carcasa y aumentar la turbulencia para mejorar, así, la transferencia de calor por el exterior de los tubos.

El espaciamiento entre deflectores debe determinarse de acuerdo a los criterios que se exponen en las normas TEMA.

10.4.3.7.-Cabezales

Los intercambiadores de calor cuentan con dos cabezales:

— El cabezal de distribución constituye el extremo frontal del intercambiador y es un elemento similar a la carcasa, cuya función es recibir el fluido que ha de circular por el interior de los tubos, distribuirlo y recolectarlo para mandarlo fuera de él.

— El cabezal de retorno constituye el extremo posterior y tiene como función retornar el fluido que circula por el interior de los tubos hacia el cabezal de distribución.

En el presente proyecto Fin de Carrera se ha seleccionado un cabezal de tipo flotante para ambos intercambiadores, ya que éste permite evitar los esfuerzos producidos por la expansión y contracción de los tubos causados por la temperatura debido a que en él los tubos están dispuestos de tal forma que son independientes de la carcasa mediante una junta elástica. Además, los intercambiadores con cabezal flotante permiten, a diferencia de los otros, la limpieza mecánica.

En el caso específico del intercambiador líquido-líquido, se emplea un cabezal con dispositivo de apoyo (tipo S), que es el utilizado en las refinerías e industrias petroquímicas y que, además, previene las fugas.

Para el calderín, se diseña un cabezal flotante extraíble (tipo T), que es similar al cabezal con dispositivo de apoyo pero sin sujeción. Esto posibilita que el haz de tubos se pueda

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

retirar de la carcasa sin necesidad de desmontar la cubierta, bastante grande en estos intercambiadores, reduciendo así el tiempo de mantenimiento durante la inspección y las reparaciones.

10.4.3.8.-Soportes

Nuestros intercambiadores de carcasa y tubos están soportados por medio de dos silletas, que a su vez, están aguantadas en cimentaciones, para proporcionar estabilidad y altura al intercambiador.

Las silletas son del mismo material que la carcasa y se localizan cerca de las líneas de tangencia de los cabezales, con el fin de utilizarlas como anillos atiesadores.

10.4.3.9.-Aislamiento

Es necesario aislar ambos equipos ya que la temperatura de la superficie es mayor a 60 °C. Al igual que en el resto de equipos, se aísla el reboiler mediante lana de roca recubierta de aluminio.

10.4.4.-Especificaciones de los intercambiadores

Vamos a incluir en este apartado unas tablas a modo de resumen que recogen la información más relevante sobre los intercambiadores de carcasa y tubos que se han diseñado en la línea de proceso proyectada.

Si se desea conocer más detalles acerca de cada intercambiador se recomienda la lectura del **Anexo 4**, donde se profundiza más en cada uno de estos intercambiadores y se exponen los pasos de cálculo y simplificaciones que se han tenido en cuenta para su diseño.

→ Intercambiador líquido-líquido para el acondicionamiento de la alimentación de la columna de destilación.

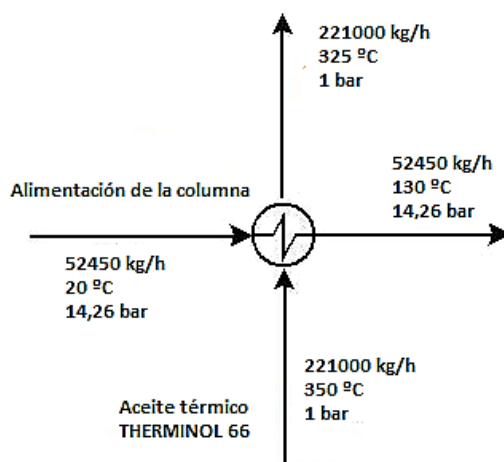


Figura 23.-Diagrama de flujo del intercambiador ICA

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Intercambiador ICA	
Código	Norma TEMA
Designación	AES
Posición	Horizontal
Tubos	
Material	SA-106 B
Diámetro interior [mm]	16
Espesor [BWG]	12
Longitud [m]	11,7
Disposición	Triangular
Pitch [in]	1
Nº tubos	69
Nº pasos	2
Área de transferencia [m ²]	48,32
Carcasa	
Material	SA-285 C
Diámetro [in]	15,25
Espesor [in]	0,75
Nº pasos	1
Deflectores transversales	
Tipo	Segmentados
Diámetro [in]	15,25
Espesor [in]	0,25
Nº deflectores	8
Distancia entre deflectores [m]	0,8
Soporte	
Tipo	Silletas
Material	SA-253 C
Aislamiento	
Material	Lana de roca
Espesor [mm]	120

Tabla 24.-Diseño del intercambiador ICA

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

→ Calderín de la corriente de colas de la columna

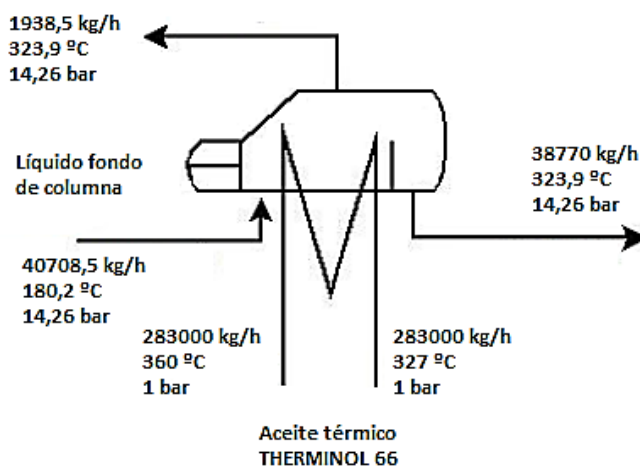


Figura 24.-Diagrama de flujo del calderín (CV)

Calderín (CV)	
Código	Norma TEMA
Designación	AKT
Posición	Horizontal
Tubos	
Material	SA-106 B
Diámetro interior [mm]	19
Espesor [BWG]	12
Longitud [m]	25,73
Disposición	Triangular
Pitch [in]	1
Nº tubos	282
Nº pasos	4
Área de transferencia [m ²]	452,97
Carcasa	
Material	SA-285 C
Diámetro inferior [in]	39
Diámetro superior [in]	64,35
Espesor[in]	0,75
Nº pasos	1
Soporte	
Tipo	Silletas
Material	SA-285 C
Aislamiento	
Material	Lana de roca
Espesor [mm]	120

Tabla 25.-Diseño del calderín (CV)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

10.5.-Aerorefrigeradores

Una vez hemos descrito los intercambiadores de carcasa y tubos que tenemos en nuestro diseño, ya sólo nos queda hablar sobre el aerorefrigerador encargado de condensar la corriente de destilado. El proceso de cálculo y más detalles de este equipo se encuentran expuestos en el **apartado 4.3 del Anexo 4 de la Memoria**.

10.5.1.-Reglamentos y códigos de diseño

Para el diseño de los aerorefrigeradores ha sido necesario combinar el código ASME con una de las normas API.

A continuación exponemos el alcance de cada uno de ellos y con qué finalidad hemos hecho uso de los mismos.

— Del código ASME (American Society of Mechanical Engineers) se toma en particular la norma ASME B31.3, que es el código por excelencia utilizado para el diseño de tuberías a presión en la sección “Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping Code”. Este Código contiene reglas para las tuberías que se encuentran típicamente en las refinerías de petróleo y en industria química.

Se establecen en ella los requisitos de materiales y componentes, diseño, fabricación, ensamblaje, montaje, examen, inspección y pruebas de las tuberías.

— Por otro lado se aplica la norma API Standard 661: “Air Cooled Heat Exchangers for General Refinery Service”, publicada por el American Petroleum Institute. Esta norma internacional proporciona requisitos y recomendaciones para el diseño, materiales, fabricación, inspección, pruebas y preparación para el envío de intercambiadores de calor refrigerados por aire para su uso en las industrias de petróleo y gas natural.

10.5.2.-Descripción y funcionamiento

Los aerorefrigerantes consisten en tubos horizontales con aletas por cuyo interior circula, desde el cabezal de distribución hasta el de recolección, la corriente que se desea enfriar o condensar. El fluido refrigerante es aire, el cual es impulsado por grandes ventiladores de modo que atraviesa el banco de tubos en sentido perpendicular, optimizando así la transferencia de calor.

Existen dos clases de aerorefrigeradores:

De tiro forzado, el cual impulsa el aire sobre la superficie de los tubos canaletas a través de unos ventiladores que están situados debajo de los haces de tubos

De tiro inducido, tiene el ventilador arriba del haz y el aire es arrastrado a través de la superficie del tubo con aletas.

Entre las principales ventajas de emplear aerorefrigerantes encontramos:

— El aire es un recurso sin coste y abundante que no necesita ser preparado, no es corrosivo y no requiere de un control de suciedad.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— El diseño mecánico de los aerorefrigeradores es sencillo ya que el fluido siempre circula por los tubos.

— Elimina problemas medioambientales como el calentamiento del medio receptor (ríos o lagos).

— Son fáciles de limpiar y su mantenimiento es entre un 20-30% más barato que el de los enfriadores de agua.

Por el contrario, entre sus principales inconvenientes encontramos:

— Requieren grandes áreas debido a que el aire tiene un bajo coeficiente de transferencia de calor y no se puede situar en zonas muy obstruidas donde no llega el aire, por ser éste el fluido refrigerante.

— No se puede enfriar a temperaturas muy bajas y las variaciones de temperatura estacionales hacen que el control de ésta sea difícil.

— Hacen mucho ruido.

10.5.3.-Características generales de los aerorefrigeradores

Podemos afirmar que el criterio de diseño más importante para asegurar un buen funcionamiento de este tipo de enfriadores es elegir, de acuerdo a las necesidades, el tipo de tiro de aire que se requiera.

Los ventiladores de tiro forzado requieren por regla general de menores volúmenes de aire y de menos potencia para lograr retirar la misma cantidad de calor que un ventilador de tiro inducido, debido a que cuentan con la ventaja de poder controlar el aire frío que entra en el intercambiador. Tienen, también, una mayor transferencia de calor debido a que el uso de ventiladores hace que se genere régimen turbulento a lo largo de todo el haz de tubos.

Las razones anteriormente expuestas hacen que nos decantemos en este Proyecto por el diseño de un aerorefrigerante de tiro forzado, ya que presenta muchas ventajas respecto del otro tipo y se adecua perfectamente a nuestras necesidades.

En lo que sigue de apartado vamos a hacer una descripción de los elementos constitutivos de los aerorefrigeradores de tiro forzado.

10.5.3.1.-Material

Tenemos diferentes elementos que constituyen el aerorefrigerante; así las aletas están fabricadas en aluminio; las tuberías en acero al carbono SA-106 B, que es el recomendado para temperaturas de trabajo menores de 450 °C y fluidos no corrosivos; mientras que el resto de elementos (cabezales, cámara, soportes) están fabricados en acero SA-283 C por ser uno de los más usados en recipientes a presión, resultando además una opción económica.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

10.5.3.2.-Haz de tubos

Para nuestro diseño hemos seleccionado tubos de sección circular con un diámetro de una pulgada, por ser los más usados en este tipo de equipos. Su uso se recomienda en la norma API Standard 661. La selección del espesor de estos tubos se basa en el margen de corrosión necesario, el cálculo de las tensiones según el código, las dimensiones estandarizadas y el coste (ver **apartado 4.3.6 del Anexo 4 de la Memoria**).

Respecto a la disposición de los tubos hemos seleccionado la más común para este tipo de equipos, que no es otra que la disposición al tresbolillo.

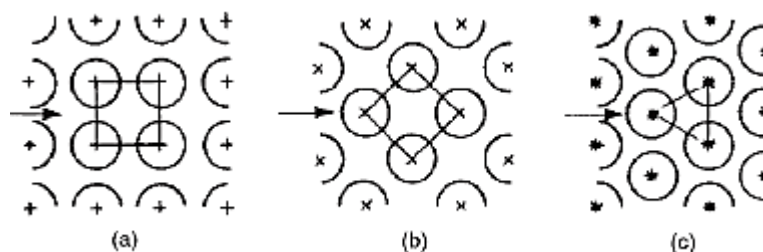


Figura 25.-Distintas configuraciones de los tubos. a) Cuadrada, b) cuadrada girada, c) triangular o tresbolillo

Los tubos se encuentran distribuidos en varias filas, las cuales son paralelas entre sí. A su vez, cada fila contiene un amplio número de tubos que son también paralelos entre sí. Con esta configuración conseguimos aumentar la eficacia de la transferencia de calor ya que la corriente tiene un mayor contacto con los tubos.

10.5.3.3.-Aletas

El coeficiente de transferencia de calor para el fluido que circula por el interior de los tubos es en torno a 10 veces mayor que el del aire, por lo que para suplir la existencia de una baja capacidad de transmisión de calor vamos a emplear una gran superficie de intercambio. Para ello vamos a emplear tubos con aletas, logrando un área de transferencia cercana a seis veces la que se logra con un tubo desnudo.

Las aletas empleadas son integrales al tubo, es decir, se fabrican por extrusión uniéndose mecánicamente al tubo. Hemos seleccionado este tipo de aletas por ser las más comunes y ser adecuadas para las condiciones de operación a las que se le somete en este diseño.

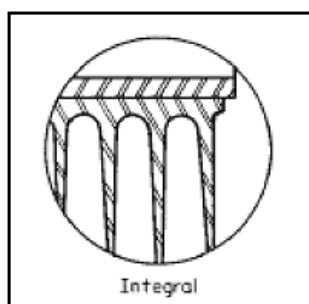


Figura 26.-Esquema aletas integrales

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Se disponen aletas altas de altura estándar igual a 1/4 in. Con respecto a su espesor, la norma API Standard 661 recomienda para las aletas con una altura que no exceda la media pulgada seleccionar un espesor mínimo de 0,014 in.

La densidad de aletas recomendada es de 8 aletas/in , la cual supone un espaciamiento de 0,111 in, cumpliendo así la restricción de la norma API Standard 661 que indica que el espaciamiento entre aletas ha de ser inferior a 1,5 veces el espesor de los tubos(ver **apartado 4.3.6 del Anexo 4**).

10.5.3.4.-Cabezales

El aerorefrigerador dispone de dos cabezales, uno conforma el extremo frontal (cabezal de distribución) y otro el posterior (cabezal de retorno).

Estos cabezales pueden ser de tres tipos: cajas enchufadas, cajas extraíbles con cubierta para servicios de alta suciedad o cajas de construcción soldada.

En nuestro caso particular ambos cabezales son de tapón con caja soldada. De este modo cada cabezal está totalmente cerrado con tapones roscados para cada tubo y situados en la cara del cabezal opuesto a la placa tubular, de forma que quitando estos tapones queda accesible cada tubo individualmente para su limpieza.

10.5.3.5.-Ventiladores

Los ventiladores más adecuados para nuestras condiciones de diseño son los circulares de flujo axial. Estos ventiladores deben su nombre a que el aire entra y sale de ellos en dirección axial proyectándose hacia el haz de tubos.

El número de ventiladores depende del diseño de cada aerorefrigerador para asegurar que toda el área de los tubos esté en contacto con el aire. Cada ventilador dispone de 4 álabes de composite de plástico y su diámetro depende de la anchura de cada fila, siendo ligeramente inferior a éstas.

Los ventiladores se colocarán de forma que estén alineados en la dirección de la longitud de los tubos.

10.5.3.6.-Impulsores de ventiladores

El movimiento rotatorio de cada ventilador está originado por un impulsor que puede ser un motor o una turbina de vapor. Para el caso de ventiladores con baja potencia es preferible la instalación de un motor conectado con engranajes.

10.5.4.-Especificaciones del aerorefrigerador

Vamos a incluir en este apartado una tabla a modo de resumen que recoge la información más relevante sobre el aerorefrigerador que se ha diseñado en la línea de proceso proyectada.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

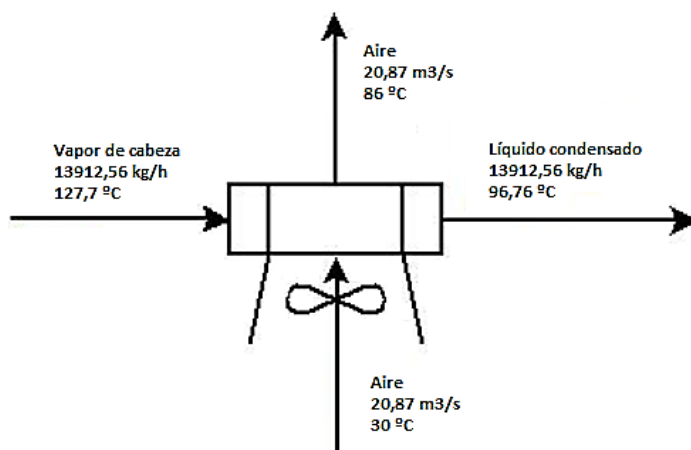


Figura 27.-Diagrama de flujo del aerorefrigerador

Haz de tubos	
Material	SA-285 C
Diámetro exterior [in]	1
Espesor [BWG]	12
Longitud [ft]	30
Disposición	Triangular
Pitch [in]	2,5
Nº tubos por fila	26
Nº tubos	156
Nº filas	6
Área de transferencia [m ²]	1380
Anchura del haz [m]	2,02
Aletas	
Material	Aluminio
Densidad [aletas/in]	8
Espesor [mm]	0,36
Altura [in]	0,25
Área de transferencia de la aleta [m ²]	0,0013
Ventiladores	
Número	3
Diámetro [m]	1,98
Distancia entre centros de ventiladores contiguos [m]	3,054
Distancia del ventilador al haz inferior [m]	1,524
Potencia turbinas [kW]	2,74
Aire	
Velocidad frontal [m/s]	3,5
Caudal [m ³ /s]	20,87

Tabla 26.-Diseño del aerorefrigerador

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 11.- SISTEMA DE CONDUCCIONES Y ACCESORIOS

11.1.-Introducción

En el capítulo que se presenta vamos a describir el sistema de tuberías que conducen los fluidos a lo largo de la línea de procesos que se diseña, sabiendo que el dimensionamiento de las mismas es función del fluido que circula por ellas y de las características del material con el que se fabrican.

El diseño de tuberías guarda un lugar muy importante en el proceso y es una parte indispensable para el funcionamiento de la planta. Las características principales que se van a obtener en este diseño son: el diámetro óptimo, la velocidad del fluido circulante, el espesor que han de tener las tuberías para soportar todas las tensiones y las pérdidas de carga que experimenta el fluido al circular a través de ellas para, en el siguiente capítulo, determinar los sistemas de impulsión necesarios. Además, se hace referencia a los componentes y accesorios presentes en las tuberías.

Durante todo el proceso de diseño se ha seguido el código ASME B31.3 “Process Piping” para tuberías a presión del “ASME Code for Pressure Piping”, que es el código más extendido para el diseño de tuberías.

El desarrollo del proceso de cálculo así como los resultados de la aplicación del mismo se recogen en el **Anexo 6 de la Memoria**, correspondiente al diseño de las tuberías. En este capítulo no vamos a recoger dichas tablas ya que los valores concretos se pueden consultar el Anexo anteriormente citado.

11.2.-Características generales del sistema de conducciones

Como venimos haciendo en capítulos anteriores, en este apartado vamos a tratar las principales características de los sistemas de conducciones y en ciertos aspectos se puntualizarán particularidades del sistema que se diseña.

11.2.1.-Materiales

Como ya hemos mencionado, el material en el que se construyen las tuberías es uno de los factores que mayor influencia tiene en su dimensionamiento. Con objeto de simplificar el proceso de diseño en este Proyecto hemos seleccionado el mismo material para todas las conducciones, siendo este el acero al carbono SA-240 (AISI 316), apropiado para todas las corrientes que tenemos en la línea de procesos.

11.2.2.-Diámetro

Los diámetros nominales normalizados están comprendidos entre 1/8 y las 30 pulgadas. De tal modo que para tuberías de 1/8 a 12 pulgadas, ambas incluidas, el diámetro exterior es algo superior al diámetro nominal, mientras que para tuberías de 14 pulgadas o mayores el diámetro exterior es idéntico al diámetro nominal.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El tamaño óptimo de cada tramo de tubería depende de los costes relativos de instalación, de la potencia, del mantenimiento y de las tuberías y accesorios de repuesto. Para la estimación de los diámetros deben tenerse en cuenta la velocidad del flujo, la viscosidad del líquido, el estado de agregación de la corriente y su forma de fluir.

11.2.3.-Espesor

El espesor de las tuberías debe calcularse de acuerdo a la presión interna que se crea en el interior de las mismas. El espesor de la pared de las tuberías viene expresado en términos del número de "Schedule", el cual lleva asociado un valor determinado de espesor según el diámetro nominal de las mismas. Las tuberías que se diseñan deben tener un espesor adecuado para soportar la presión de trabajo. Para simplificar el diseño se opta por tomar el mayor de los espesores necesarios para el conjunto del sistema de conducción de la línea de proceso completa, es decir, optamos por un sobredimensionamiento.

11.2.4.-Aislamiento

Las tuberías que se han diseñado para nuestra línea de proceso necesitan de un aislante térmico para evitar variaciones en la temperatura del fluido que transportan. En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha optado por emplear fibra de vidrio para este cometido, por resultar económico, además de adecuarse a las necesidades del proceso.

11.2.5.-Elementos y accesorios

Los accesorios que se instalan en los sistemas de conducciones tienen como misión permitir cambiar la dirección de flujo, mantener un funcionamiento seguro, regular los caudales, etc.

En este apartado vamos a describir los accesorios que se instalan en la línea de proceso proyectada, exponiendo sus características principales.

✓ Codos:

Los codos son accesorios para tuberías cuya misión es cambiar la dirección de flujo. Se encuentran en el mercado codos de 90° y 45°, cuyos radios varían entre pequeños, medios y grandes; algunos pueden incluir una reducción simultánea. Debido al flujo turbulento existente en ellos se produce un aumento de la corrosión y la erosión de las tuberías en esas zonas. Por ello, siempre que sea posible, se opta por instalar codos largos de 90° con el fin de suavizar estos efectos.

✓ Tés:

Son ramificaciones que pueden tener tres o cuatro salidas, en un mismo plano o en planos diferentes y pueden tener alguna salida de tamaño diferente a las otras (reducciones). Se emplean para separar una corriente en varias, para juntar dos corrientes en una tercera, etc.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Reducciones graduales:

Se usan para facilitar la unión entre tramos de conducciones que disponen de distinto diámetro y que de otra forma no podrían unirse. Permiten la reducción progresiva del diámetro de la tubería evitando así grandes pérdidas de carga, como las que tiene lugar cuando se realizan reducciones bruscas.

✓ Manguitos:

Se usan para unir dos tramos rectos de tubería. En función de la forma que tengan las roscas de sus extremos se clasifican en doble hembra, doble macho, macho-hembra y manguitos con reducción.

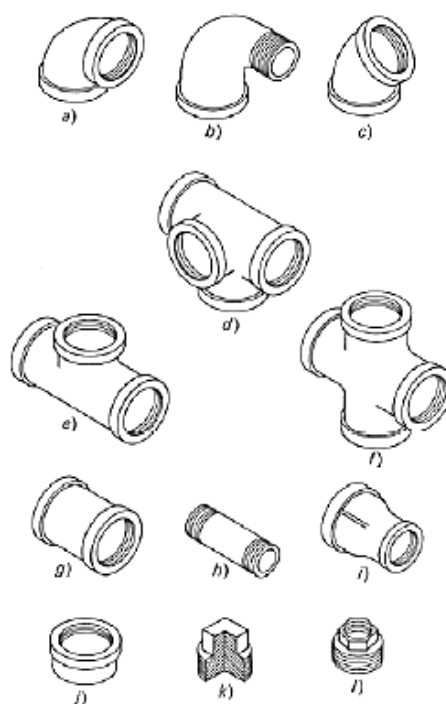


FIG. 8.4. Accesorios para tuberías roscadas.

- | | |
|-----------------------------------|---|
| a) Codo de 90°. | g) Manguito doble hembra. |
| b) Codo de 90° con reducción. | h) Manguito doble macho. |
| c) Codo de 45°. | i) Manguito macho-hembra con reducción. |
| d) «Te» plana con salida lateral. | j) Tapon ciego hembra. |
| e) «Te» plana. | k) Tapon ciego macho. |
| f) Cruceta. | l) Casquillo. |

Figura 28.-Esquema accesorios de conducciones

✓ Válvulas de corte de flujo:

Este tipo de válvulas se caracterizan por presentar dos posiciones extremas de funcionamiento, de modo que pueden estar totalmente abiertas o cerradas.

Se caracterizan por tener un órgano de cierre que ocupa prácticamente toda la sección de la conducción, de tal modo que cuando se encuentran completamente abiertas no encuentran apenas estrechamiento alguno por lo que no se experimenta pérdida de presión ni aumento de velocidad apreciables.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En el presente Proyecto se han empleado válvulas de corte de flujo del tipo válvulas de compuerta, cuya función es detener el flujo del fluido. Generalmente se encuentran completamente abiertas y se colocan antes y después de cada bomba de impulsión.

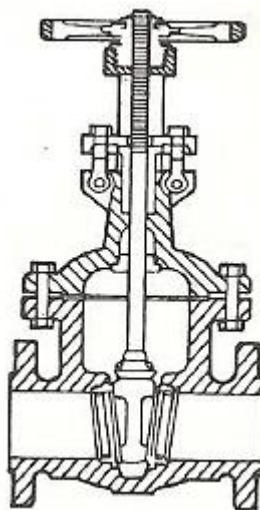


Figura 29.-Esquema de una válvula de compuerta (Greene, 1986)

✓ Válvulas de retención:

Permiten el flujo en una única dirección y se disponen en las tuberías de impulsión entre la salida de las bombas y la entrada de las válvulas de compuerta. Estas válvulas se abren debido a la presión que ejerce el fluido que circula en una determinada dirección; cuando se detiene el flujo o tiende a invertirse la válvula se cierra, impidiendo que esto suceda.

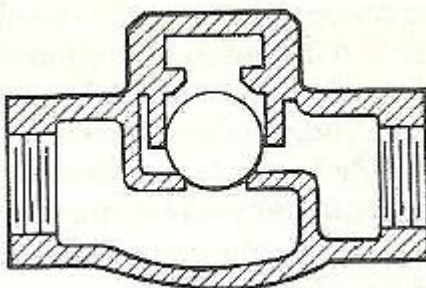


Figura 30.-Esquema de una válvula de retención de bola (Greene, 1986)

✓ Válvulas de globo:

Las válvulas de globo tienen la misión de regular la velocidad de flujo y se encuentran en todos los puntos de la planta donde se necesita un correcto control del caudal. La caída de presión en las válvulas de globo es elevada pues el fluido debe circular a través de una pequeña abertura y cambiar varias veces de dirección.

Diseño de una unidad de hidrosulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

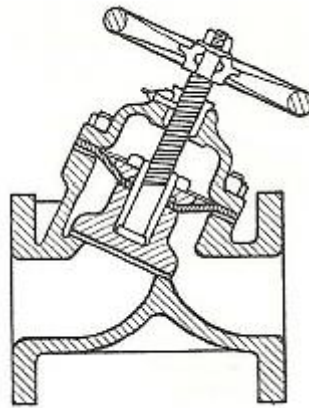


Figura 31.-Esquema de una válvula de globo (Greene, 1986)

✓ Válvulas de seguridad:

Este tipo de válvulas se usan para evitar sobrepresiones que puedan generar problemas en los equipos. Suelen llevar un disco de ruptura que está diseñado para soportar una presión algo inferior que la presión de diseño de los equipos que se desean proteger, de modo que si esta presión es superada este disco se romperá dejando escapar el fluido, al aire en caso de fluidos no peligrosos o la red de antorcha de la refinería en caso de tratarse de fluidos peligrosos.

✓ Placas de orificio:

Se consideran medidores indirectos del caudal volumétrico en la planta y consisten básicamente en una placa perforada instalada en el centro de la tubería que transporta el fluido.

Es necesario situarlas en tramos rectos de tubería aguas arriba, principalmente, y aguas abajo de los medidores con el fin de evitar que las perturbaciones en el flujo que ocasionan las válvulas, los codos y otros accesorios puedan afectar a la medida.

✓ Bridas:

Las conexiones entre los distintos tramos de tuberías, así como la unión de estas con los diferentes equipos y accesorios se lleva a cabo por medio de bridas. Las bridas están constituidas por un par de discos de metal unidos entre sí mediante tornillos que comprimen una junta que se encuentra situada entre sus caras.

Las uniones bridadas facilitan las labores de mantenimiento y sustitución de secciones de tubería, esto se debe a que no son uniones herméticas.

11.2.6.-Disposición de las tuberías y uniones

Existen una serie de consideraciones que es recomendable tener en cuenta si deseamos optimizar el diseño del trazado del sistema de conducciones en una determinada línea de proceso. Éstas pueden resumirse en los siguientes puntos:

Diseño de una unidad de hidrosulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Las diferentes tuberías se distribuyen, siempre que sea posible, en haces paralelos, dejando entre ellas una distancia tal que anule la posible influencia mutua entre las mismas.

— Se maximiza el número y tramos de tuberías sobre el terreno, que van apoyadas en durmientes, y así se evita la construcción de pilares de hormigón para soportar las tuberías aéreas.

— Los tramos de tubería recta deben ser de la mayor longitud posible.

Así mismo, encontramos una serie de recomendaciones generales acerca de la instalación de las uniones de las tuberías:

— Para tuberías de diámetro mayor de 2 pulgadas se unen entre sí mediante soldadura a tope.

— Las tuberías de diámetro inferior a 2 pulgadas se unen entre sí mediante soldadura a solape o de enchufe y soldadura.

— Las conexiones entre válvula-tubería y equipo-tubería se realizarán a través de bridas, ya que es conveniente que dichas uniones sean desmontables.

— Las conexiones entre válvulas y equipos se llevan a cabo con uniones permanentes, concretamente, con manguitos de enchufe y soldadura.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 12.-SISTEMAS DE IMPULSIÓN

12.1.-Introducción

Para el transporte de fluidos compresibles de un punto a otro de la línea de proceso se emplearán bombas; que son máquinas hidráulicas que transfieren energía mecánica a los fluidos incompresibles permitiendo transportarlos de un punto a otro a través de conducciones, accesorios y equipos.

Para el transporte de fluidos compresibles se emplearán compresores, que tienen las mismas funciones que las bombas pero su diseño está destinado al transporte de gases.

La selección de estos equipos y el proceso de cálculo necesario para el diseño de los mismos se explica de forma detallada en el **Anexo 7 de la Memoria**, por lo que se recomienda la lectura del mismo.

En el presente capítulo vamos a exponer las características principales de las bombas centrífugas y de los compresores, que son los equipos finalmente seleccionados para nuestro Proyecto.

12.2.-Reglamentos y códigos de construcción

El diseño de las bombas centrífugas instaladas en la planta estará regulado por la norma API 610, denominada "Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries"

12.3.-Parámetros de selección de bombas

Entre las variables más importantes a la hora de elegir el equipo de bombeo más adecuado destacan:

— **El caudal total:** es una de las variables principales a la hora de elegir una bomba y en el presente Proyecto se ha empleado para ello el método gráfico, como podemos apreciar en el **Anexo 7**.

— La **carga útil:** es la diferencia entre la presión total de descarga y la carga de succión, esto es, la carga o presión que debe aportar la bomba para elevar el fluido hasta el punto de descarga venciendo desniveles, presiones y resistencias que surgen a lo largo del tramo de tubería.

— **Altura positiva neta de succión disponible (NPSHd):** es la diferencia entre la energía que tiene el líquido en la toma de aspiración de la bomba y la energía del mismo debido a su presión de vapor.

Las bombas adquiridas deben seleccionarse según su valor de altura de aspiración neta positiva requerido (NPSHr), que debe ser inferior al anterior (NPSHd) para evitar problemas de cavitación.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— **Condiciones de operación:** cada bomba del mercado tiene asociado un rango óptimo de presiones y temperatura a los que trabaja con seguridad y de manera óptima. Esto depende, principalmente, del material de construcción del equipo.

— **Propiedades del fluido:** los fluidos densos tienden a precisar un aumento de la potencia de la bomba requerida para su impulsión y producen una reducción tanto de la eficacia de la bomba como de la carga y capacidad de la misma. Además, la densidad del fluido afecta al caudal volumétrico y, a su vez al diámetro de la tubería necesario.

— **Corrosión y presencia de sólidos en suspensión:** es importante conocer estas propiedades para poder exigir materiales o recubrimientos específicos y rodets especiales.

12.3.1.-Bombas centrífugas

Tras aplicar el criterio de selección de bombas en el **Anexo 7**, tenemos que todas las bombas a diseñar en el presente Proyecto Fin de Carrera son bombas centrífugas.

Este es el tipo de dispositivo que más se utiliza en la industria química para transferir líquidos de todo tipo. Se comercializan con una amplia variedad de tamaños, capacidades y alturas de descarga. Son versátiles, sencillas, tienen un bajo coste inicial y de mantenimiento, flujo uniforme, necesitan poco espacio y son silenciosas

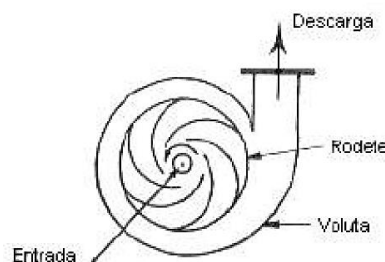


Figura 32.-Esquema de bomba centrífuga

Las bombas centrífugas constan de:

- Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- El impulsor o rodete, formado por una serie de álabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular. El rodete va unido solidariamente al eje y es la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta el centro del rodete, que es accionado por un motor, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, y absorbiendo un trabajo. Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad. En la voluta se transforma parte de la energía cinética adquirida en el rodete, en energía de presión, siendo lanzado el líquido contra las paredes del cuerpo de bomba y evacuado por la tubería de impulsión.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- La carcasa o voluta, está dispuesta en forma de caracol, de tal manera, que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. De esta forma aumenta la presión del líquido a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta.
- Una tubería de impulsión.

12.4.-Sistemas de impulsión de gases

La diferencia fundamental entre la impulsión de un líquido y un gas reside en la posibilidad de reducir el volumen de este último por compresión, a costa naturalmente de aumentar su densidad, fenómeno que no ocurre en la impulsión de líquidos.

Los aparatos destinados a la impulsión de gases suelen clasificarse en tres grupos, según sea el valor de la presión de descarga o de la razón de compresión, que es el cociente entre la presión de descarga y la presión de carga. Así encontramos los siguientes equipos:

- Ventiladores: presiones de descarga de 1,2 a 15 kN/m². Razón de compresión ≈ 1
- Soplantes: presiones inferiores a 4·10² kN/m². Razón de compresión ≤ 4
- Compresores: presiones superiores 4·10² kN/m². Razón de compresión ≥ 10

No obstante, esta clasificación no es muy rigurosa, pudiendo hablarse indistintamente de ventiladores o soplantes cuando el aparato de impulsión produce una presión intermedia próxima a los dos intervalos citados. Igual podría decirse respecto a los soplantes y compresores.

A continuación vamos a hacer una descripción de cada uno de estos equipos:

12.4.1.-Ventiladores

Se utilizan para impulsar grandes caudales de gas a bajas presiones, sin que apenas se produzca variación en su densidad; de hecho, no comprimen prácticamente el gas, sino que se limitan a hacerlo circular.

Se suelen clasificar según la dirección del flujo en:

- Ventiladores axiales: constan de uno o más discos dotados de aspas o álabes que giran sobre un eje paralelo a la dirección de flujo del gas. Dichos álabes pueden ser rectos o curvos y el diámetro del rotor puede ser de hasta varios metros.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

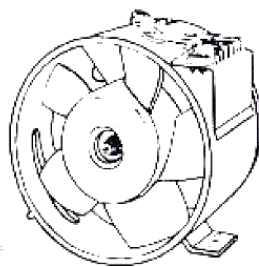


Figura 33.-Esquema ventilador axial

- Ventiladores centrífugos: la presión de descarga procede de la fuerza centrífuga debida a la rotación de la masa de gas contenida en el interior de ventilador y de la energía cinética que las paletas comunican al gas, convertida parcialmente en energía de presión en la voluta. El rotor giratorio puede ser de álabes rectos, curvados en la dirección de giro o curvados en la dirección contraria.

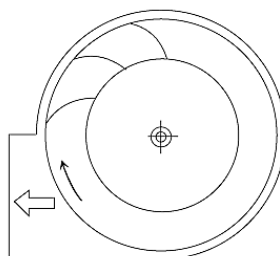


Figura 34.-Esquema ventilador centrífugo

12.4.2.- Soplantes

Conocidos también como compresores de baja presión, son aparatos de impulsión de gases que proporcionan presiones en el rango $2,5 \cdot 10^{-2}$ - $4 \cdot 10^2$ kN/m². Existen diversos tipos, según sea el flujo del gas: desplazamiento positivo, centrífugos (de una sola etapa), axiales (de múltiples etapas).

Las soplantes centrífugas o turbosoplantes son las más usadas en la industria, realizando una gran variedad de servicios, como son operaciones de enfriamiento de agua, secado, inyección de aire a hornos de combustión, aireación, agitación, ventilación, etc.

12.4.3.-Compresores

Estos aparatos, como ya se ha indicado, se utilizan para impulsar gases a presiones superiores a los $4 \cdot 10^2$ kN/m².

La compresión adiabática de un gas se produce con generación de calor, que provoca una considerable elevación de temperatura. Este fenómeno adquiere mucha importancia en el caso de los compresores, especialmente en los de desplazamiento positivo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Encontramos dos tipos principales de compresores industriales:

— Los compresores alternativos: son los más utilizados en la industria química. Constan de uno o más cilindros en serie, cuyo funcionamiento es totalmente similar al de las bombas alternativas. Los sistemas de refrigeración acoplados a estos equipos pueden ser por aire o con intercambiadores de calor, en función del tamaño de los mismos.

— Los compresores centrífugos de múltiples etapas (también conocidos como turbocompresores) son análogos a las bombas centrífugas de múltiples etapas.

Finalmente recordar que tenemos todos los detalles de los equipos seleccionados y diseñados en el **Anexo 7**, dedicado a los sistemas de impulsión.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 13.-MANTENIMIENTO

13.1.- Introducción

El mantenimiento es un servicio que se encuadra dentro de la gestión de una empresa en la función de producción, y sin él, difícilmente se llegaría a realizar de forma continua un proceso industrial para obtener un determinado producto.

Cualquier proceso industrial tiene como objetivo emplear el capital mínimo en instalaciones, maquinaria y mano de obra para que, obteniendo la calidad y cantidad deseada, puedan conseguirse los mayores beneficios.

Conseguir, por tanto, un óptimo mantenimiento, hará que la productividad que se alcance sea la mejor y mayor y ello conllevará a que las pérdidas económicas, los accidentes, las emisiones no deseadas al medio ambiente y catástrofes sean mínimos.

Mantener los equipos de producción e instalaciones en perfectas condiciones de funcionamiento es el factor más importante a tener en cuenta para lograr este objetivo.

La seguridad de funcionamiento de los sistemas de producción se puede definir como el conjunto de medidas, normas, medios y actuaciones que tienen como finalidad que el plan de producción se desarrolle tal y como estaba previsto, siempre dentro de los riesgos técnicos que han sido asumidos.

De igual modo, la higiene industrial está directamente ligada al control de los riesgos para la salud que resultan del desempeño de una labor en la misma planta. Su contenido es básicamente técnico y su fin último es la prevención de las enfermedades a los profesionales a través de la aplicación de técnicas de ingeniería que actúan sobre los contaminantes del ambiente de trabajo.

13.2.- Mantenimiento

En este apartado se quiere mostrar el mantenimiento que se abordará en la línea de proceso que se diseña en este Proyecto Fin de Carrera.

13.2.1.- Funciones de mantenimiento

Se pueden distinguir cuatro funciones en las labores de mantenimiento:

13.2.1.1. Planificación

La planificación consiste en preparar el trabajo con la antelación suficiente para evitar tiempos muertos. Para ello, se debe dividir en sus tareas básicas y prever los medios materiales y humanos necesarios. Así se ahorrarán interrupciones por falta de materias, repuestos o herramientas, o enviar más personal que el necesario.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Durante la planificación se realizarán los estudios necesarios para reducir el número de averías imprevistas. En función de los datos históricos disponibles, se efectuarán previsiones de los repuestos de almacén necesarios para el mantenimiento de los equipos.

✓ **Programación**

Se determinará cuando debe iniciarse el trabajo y de acuerdo con las estimaciones realizadas al planificarlo, cuando se prevé que termine. Esto no significa que la programación sea rígida, pues las instalaciones obligarán a modificar el programa, por ello debe ser flexible.

Cuando se dispone de la información necesaria para planificar el trabajo de mantenimiento en planta se asignarán prioridades para conseguir un rendimiento aceptable.

✓ **Ejecución**

Durante la ejecución del mantenimiento se llevará a cabo la programación antes expuesta y se estudiarán los posibles cambios que aparezcan.

Si fuese necesario se intervendrá en los proyectos de modificación del diseño de equipos e instalaciones donde se ejecutará aquellas tareas que implican su modificación del diseño o la instalación de nuevo equipo así como el asesoramiento a los mandos de producción.

✓ **Control**

Mantener los equipos e instalaciones en condiciones operativas eficaces y seguras es una función primordial. Se efectuará un control del estado de los equipos así como de su disponibilidad.

13.3. Tipos de mantenimiento

Para conseguir un correcto funcionamiento de la planta, se recurre, no únicamente a un tipo de mantenimiento u otro, sino a una combinación de los cuatro mantenimientos para abarcar todos los posibles problemas a los que se enfrenta la planta de producción y así abaratar los costes. Un mantenimiento exhaustivo dispararía los costes, por lo que siempre se buscará el equilibrio en el buen mantenimiento.

13.3.1. Mantenimiento correctivo

Consiste en la reparación de un equipo o pieza averiada. Se actúa sobre lo averiado o desmontando la maquinaria y reparándola en el taller.

Las instalaciones están en servicio hasta que presentan anomalías o averías que obligan a pararlas. Este tipo de mantenimiento tiene el inconveniente de que el fallo no suele ser previsto por el personal, causando deterioro en los propios equipos por no intervenir de forma más temprana. Esto reduce la vida útil de los mismos y puede causar el riesgo de no disponer de los elementos necesarios para su reparación provocando así una serie de imprevistos como averías importantes o incluso siniestros en plantas.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

A pesar de que lo explicado anteriormente pueda parecer de una labor incompetente del operario, en muchas ocasiones está plenamente justificado, especialmente en aquellos casos en los que existe un bajo coste de los componentes afectados, y donde los equipos son de naturaleza auxiliar y no directamente relacionados con la producción.

13.3.2.- Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se define como la realización de ciertas reparaciones o cambios de componentes o piezas, según intervalos de tiempo, o según determinados criterios, prefijados para tratar de reducir la posibilidad de avería o pérdida de rendimiento de un equipo o instalación. Se trata pues, de un mantenimiento programado, con el fin de reducir al mínimo posible el número de paradas imprevistas de los equipos o instalaciones.

Las intervenciones sobre los equipos se realizan con la periodicidad establecida, aunque los equipos intervenidos presenten en ese momento un correcto funcionamiento. El éxito de este tipo de mantenimiento se apoya en elegir bien el período de la inspección, de forma que no se lleguen a producir averías entre dichas inspecciones, pero sin acortarlas mucho, ya que esto lo encarecería considerablemente.

Entre otras muchas ventajas, el mantenimiento preventivo tiende a reducir el número de averías, emergencias y siniestros, mejora la producción y la calidad y la vida del equipo se alarga considerablemente.

Por otra parte, los inconvenientes que presentan sus técnicas, que son varios, giran fundamentalmente alrededor de un sólo punto: los costes. Efectivamente, estas revisiones implican un alto coste. Hay que tener presente que la mayoría de las veces se trata de revisar una máquina que está funcionando correctamente, buscando alguna deficiencia que se desconoce y, por tanto, obliga a emplear mucho tiempo en revisiones y comprobaciones.

13.3.3.- Mantenimiento predictivo

Consiste en el conocimiento del estado del equipo por medición periódica o continua de algún parámetro significativo. La intervención de mantenimiento condiciona la detección precoz de los síntomas de las averías. La idea central del mantenimiento predictivo es que la mayoría de los componentes de las máquinas avisan de alguna manera de su fallo antes de que éste ocurra.

Se ejecuta con el equipo funcionando sin necesidad de recurrir a desmontajes y revisiones periódicas. Las principales ventajas que presenta el mantenimiento predictivo son:

- Ser económicamente muy rentable.
- Permite detectar averías que pudieran ser de gran magnitud, sin necesidad de parar la máquina y por supuesto sin abrirla.
- Reduce los costes de mano de obra y de repuestos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Permite disponer de un completo historial de la máquina y de su comportamiento en operación.

- Requiere muy poco personal para la ejecución de los programas de verificación en marcha de los equipos.

Y los principales inconvenientes son:

- Que la anomalía no se detecte en la verificación efectuada, bien por no captar el síntoma o por producirse durante el período comprendido entre dos inspecciones.

- Que estando todo controlado, no se permita, por motivos de producción, la reparación en el momento oportuno, dando así lugar a una evolución peligrosa del daño detectado.

13.3.4.- Mantenimiento productivo total (MPT)

El mantenimiento productivo total aplica las tendencias más recientes en cuanto a las tareas de mantenimiento, incluyendo todas las funciones del mismo.

Parte de una planificación jerárquica en todos los niveles con unas tareas concretas abarcando así una visión más amplia del mantenimiento de los equipos e instalaciones y por tanto, en la capacidad de producción y su repercusión en los costes.

13.4.- Política de mantenimiento.

La política de mantenimiento (o estrategia) consiste en definir los objetivos técnico y económicos específicos del servicio de mantenimiento, relativos a su responsabilidad sobre los equipos e instalaciones y encaminados a conseguir los objetivos generales de la planta.

La puesta en marcha de una política de mantenimiento representa una inversión, de la que se esperan beneficios. Por ello, es esencial que, el jefe del servicio de mantenimiento obtenga de la dirección los medios necesarios para conseguir los objetivos que se han fijado. Corresponde al servicio de mantenimiento gestionar los medios que le han sido facilitados.

Las diferentes fases para la puesta en marcha de una política de mantenimiento se inician con la recopilación de la información, sigue con la elección de métodos a poner en práctica, se definen los medios necesarios, se ejecutan los trabajos y se cierra el ciclo mediante el análisis de los resultados.

La puesta en práctica de una política supone la aceptación de unos compromisos que afectan a los factores: humanos, técnicos y económicos, dependiendo el valor relativo de cada uno de ellos de la naturaleza de la empresa (producción, transporte o servicio). Los objetivos que se van a seguir son:

- Operacionales:

- Mantener el equipo en perfecto estado.

- Asegurar la disponibilidad de un equipo:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- a un nivel fijado.
- a un coste dado (presupuesto).
- Llevar una máquina al máximo rendimiento:
 - alargar la vida de la máquina el mayor tiempo posible.
- Organizar las intervenciones con alta calidad (efectuando todas las comprobaciones necesarias).
- **Objetivos económicos y sociales:**
 - Garantizar una seguridad máxima al personal y a las instalaciones.
 - Disminuir los costes directos de mantenimiento.
 - Llevar a cabo una política de alta calidad.
 - Reducir las existencias de repuestos.
 - Aumentar la productividad del personal de mantenimiento.
- **Objetivos de organización:**
 - Alisar la carga de trabajo (disminuir lo "fortuito").
 - Definir la política de:
 - subcontratación.
 - aprovisionamiento.

13.5.- Mantenimiento de los equipos de la planta

13.5.1. Reactores

1. Inspección anual para la limpieza de elementos internos, acondicionamiento de sistema y apertura del cabezal y de la placa.
2. Debido a que se trabaja a altas presiones y temperaturas, se realizará una inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.
3. Limpieza exterior.
4. Revisar las conexiones con las tuberías.
5. Revisar el sistema de distribución del influente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

6. Comprobar el estado del sistema de seguridad (válvula de alivio de presión de seguridad y disco de ruptura).
7. Al encontrarse en el exterior, se protegerá con una nueva capa de pintura cada 5 años.
8. Comprobar el estado del aislante.

13.5.2.- Intercambiadores de calor

1. Inspección anual para la limpieza de elementos internos, acondicionamiento de sistema y apertura del cabezal y de la placa.
2. Debido a que se trabaja a altas presiones y temperaturas, se realizará una inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.
3. Limpieza exterior.
4. Revisar las conexiones con las tuberías.
5. Comprobar el estado del sistema de seguridad (válvula de alivio de presión de seguridad y disco de ruptura).
6. Al encontrarse en el exterior, se protegerá con una nueva capa de pintura cada 5 años.
7. Comprobar el estado del aislante.

13.5.3.- Horno de procesos

El elevado consumo energético requerido en el proceso requiere períodos importantes de enfriamiento para poder acceder al equipo, así como de calentamiento una vez finalizadas las reparaciones. Para garantizar una vida operativa óptima de los ladrillos refractarios, el funcionamiento del horno ha de ser lo más homogéneo posible, así como el resto de las condiciones operativas del proceso productivo, por lo que no permiten éste tipo de intervenciones con carácter puntual, sobre todo por las limitaciones térmicas y ambientales comentadas para poder llevar a cabo la intervención. Por lo general, cuando se hace la parada, su mantenimiento exige:

1. El sistema de lubricación automática se debe verificar semanalmente que sea correcta la programación.
2. Realizar una inspección cada tres meses de la varilla de ignición de los quemadores para poder mantener la temperatura necesaria.
3. Limpieza exterior.
4. Revisar las conexiones con las tuberías.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

5. Debido a que se trabaja a altas presiones y temperaturas, se realizará una inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.

13.5.4.- Columna de destilación (CD).

1. Inspección anual mediante las aperturas de las bocas de hombre para la limpieza de elementos internos y conocimiento de su estado.

2. Limpieza exterior.

3. Revisión de las conexiones con las tuberías.

4. Reposición de los platos deteriorados.

5. Comprobación el estado de los sistemas de control y seguridad.

6. Inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.

7. Protección con una nueva capa de pintura cada 5 años.

13.5.5.- Bombas

1. Control de arranque.

2. Comprobar las vibraciones de los motores.

3. Limpieza exterior.

4. La presión en conexión con el conducto de impulsión.

5. Comprobación de niveles de aceite.

6. La temperatura de los motores.

7. Comprobación del ajuste de la bomba y el motor.

8. Comprobación de estanqueidad.

9. Puesta en marcha periódica de los equipos de reserva.

10. Engrase de los rodamientos.

11. Comprobar automatismos.

12. Comprobar intensidades, potencias y tensiones.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

13.5.6.- Válvulas

1. Realizar revisiones periódicas con el fin de conocer el estado de las piezas que componen el interior de la válvula.
2. Apretar los tornillos de la unión entre las distintas partes.
3. Comprobar si están bien unidas todas sus partes.
4. Controlar el ruido.
5. Corregir problemas en el asentamiento e instalar nuevos discos o sellos de asiento en las válvulas que pueden repararse sin desmontar. Dentro de esta categoría se encuentran las válvulas de compuerta, globo y de retención.
6. Para las válvulas de seguridad y alivio de presión y de reducción de presión deben tomarse además las siguientes precauciones:
 - Comprobar la presión de funcionamiento.
 - Verificar si hay corrosión o erosión.
 - Comprobar si existen partículas de sólidos entre el asiento y el disco.
 - Comprobar si existe vibración de la tubería o del recipiente protegido, así como que la válvula esté instalada en posición vertical.

13.5.7.- Extintores

Cada tres meses, el personal encargado de cada línea de operación será el encargado de realizar las tareas de mantenimiento de extintores.

1. Comprobar su accesibilidad.
2. Comprobación de carga (peso y presión).
3. Estado de las partes mecánicas y comprobación del precinto.

13.6.- Puesta en marcha

La línea de proceso de producción está diseñada para funcionar durante todo el año pero está planificada la parada general de la misma, con el fin de realizar el mantenimiento oportuno de los equipos que la forman.

Una vez realizada las revisiones pertinentes, la vuelta al funcionamiento requiere realizar una serie de operaciones para adecuar la planta a las condiciones normales de trabajo.

Teniendo en cuenta que se habrá comprobado el correcto funcionamiento de todas las unidades y equipos auxiliares, es necesario preparar las unidades de reacción para alcanzar las condiciones requeridas en el transcurso de la reacción. Para ello, se procede de la siguiente forma:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En primer lugar se debe hacer pasar vapor de agua de alta presión a través de la carcasa del reactor. Una vez alcanzada la temperatura adecuada para el comienzo de la reacción, se introduce la alimentación de reactivos al sistema, de manera que transcurrido el periodo de tiempo oportuno, ésta ya se inicia por sí misma puesto que al ser una reacción fuertemente exotérmica, se genera la energía suficiente para poder prescindir del aporte de calor inicial que suponía el vapor de agua.

En estas circunstancias el sistema se encuentra en condiciones normales de trabajo, por lo que será necesario empezar la refrigeración haciendo pasar agua de condensación del sistema de caldera a través de la carcasa.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 14.-SEGURIDAD E HIGIENE

En una industria química, los trabajadores están inmersos en un ambiente que viene condicionado por las características del proceso y de su puesto de trabajo. Este medio ambiente puede dar lugar a enfermedades y a accidentes.

En este capítulo se presentan los principales riesgos que se pueden presentar en el proceso diseñado y diferentes medidas de prevención y protección para los trabajadores, los bienes materiales y el medio ambiente.

14.1.-Legislación aplicable.

En el ámbito de la seguridad se ha de conocer la legislación aplicable en dos frentes, la seguridad y la higiene laboral.

14.1.1.- Legislación para la seguridad laboral.

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro. BOE num. 302 de 19 de diciembre.
- Real Decreto 1995/1978, de 12 de mayo, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la seguridad social.
- Real Decreto 1244/1979, de 4 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión.
- Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección contra Incendios.
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales.
- Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo. Aparatos y sistemas de protección para uso en atmosferas potencialmente explosivas.
- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril. Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo. Disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de productos Químicos y sus instrucciones técnicas complementarias.

— Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.

— Real Decreto de 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.

— Decreto 3151/68, de 28 de noviembre, reglamento de la Línea de Alta tensión.

— Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

— Reglamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo y el Consejo, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

14.1.2.- Legislación para la higiene laboral.

— Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

— Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.

14.2.-Riesgo Químico.

El riesgo químico en una industria petroquímica como en la que se desarrolla el proyecto se define como la posibilidad de que se produzca un accidente de origen químico capaz de producir un daño.

Los daños se pueden dar básicamente en las instalaciones de proceso donde se dan las transformaciones o reacciones, en las instalaciones de almacenaje, en las conducciones o en las vías de transporte de los productos. Estos riesgos pueden dar lugar a daños personales, enfermedades, daños medioambientales y materiales o pérdidas de negocio.

En el presente proyecto se trabaja con productos químicos cuyas fichas de seguridad se recogen en el apartado de catálogos y fichas de seguridad, correspondiente a Fichas de Seguridad.

Las diferentes estrategias que se pueden diseñar contra el riesgo químico son:

— Desarrollo de procedimientos de trabajo, controles técnicos y equipos y materiales que permitan en lo posible evitar o reducir al mínimo, cualquier escape al ambiente o cualquier contacto directo con el trabajador que suponga un riesgo para su seguridad o salud.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Uso de medidas de protección individuales para cada trabajador que pueda llegar a estar en contacto con sustancias nocivas.

— Disposición en el lugar de trabajo todas las fichas de seguridad de los productos utilizados, debiendo estas estar a disposición de los trabajadores para que puedan consultarlas.

— Colocación de señales que indiquen el peligro que supone la sustancia, ya sea circulando por una tubería o almacenada en un tanque.

— Realización un buen mantenimiento para evitar emisiones contaminantes al ambiente de trabajo.

— Disposición de rotación del personal para evitar el tiempo de exposición de cada trabajador.

14.3.-Riesgo físico.

Estos riesgos vienen definidos por diferentes formas de energía que pueden causar enfermedades en las personas. Los principales en este proceso son el ruido y el ambiente térmico.

14.3.1.- El ruido.

Este riesgo no causa dolor ni heridas visibles pero sus efectos se acumulan con la sobreexposición y no se detecta hasta muchos años después cuando ya es un daño permanente.

De hecho, hoy en día la pérdida auditiva por ruido (NIHL) es una de las enfermedades laborales más comunes. Además de producir enfermedades auditivas, es un hecho que el ruido produce una serie de factores negativos en el organismo como aumento de la presión y ritmo cardiaco, de la tensión muscular, del metabolismo o molestias psicológicas.

La normativa actual en España (Real Decreto 286/2006) establece como valores límite de exposición 87 dB como nivel diario y los 140 dB como valor pico. Se establecen medidas de protección cuando se sobrepasan los 80dB.

Las medidas se pueden diseñar para atacar el riesgo sobre la fuente, sobre el medio de transmisión y sobre el receptor.

➤ *Sobre la fuente:*

— Cambios en la rutina o método de trabajo.

— Elección de equipos que generen menos ruido.

— Reducir al máximo los impactos y fricciones.

— Emplear lubricación adecuada.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Emplear amortiguadores que reduzcan las vibraciones.

➤ ***Sobre el medio de transmisión:***

- Aumentar la distancia existente entre la fuente y el receptor.

- Realizar un tratamiento acústico del suelo, techo y paredes para absorber el sonido y reducir la resonancia.

- Aislar acústicamente la fuente de ruido.

➤ ***Sobre el receptor:***

- Utilización de protecciones personales: tapones que reducen entre 10-20 dB y auriculares que reducen hasta 50dB.

- Aislar al trabajador.

- Realizar rotación del personal para reducir tiempo de exposición.

14.3.2.- Ambiente térmico.

El ser humano es un organismo homeotermo, esto es, que es capaz de regular su temperatura corporal en un valor constante (37 °C). Esta regulación se basa en un balance entre el calor que se genera en el interior del organismo como consecuencia de la actividad metabólica, y el intercambio de calor con el exterior.

En las situaciones normales, el cuerpo humano es capaz de mantener constante la temperatura debido al calor generado por el metabolismo cuando la acumulación de calor es pequeña. Sin embargo, cuando se somete el cuerpo a temperaturas extremas, el organismo no es capaz de compensar el balance.

Acumulaciones positivas de calor provocan un aumento de la temperatura corporal; acumulaciones negativas, un descenso de la misma. En ambos casos, se habla de situación de estrés térmico y aparecen desde un simple malestar hasta graves problemas de salud.

Algunos efectos patológicos del frío son la contracción de los vasos sanguíneos periféricos, la falta de riego sanguíneo, la congelación de partes distales, la dificultad en el habla, la pérdida de memoria o destreza manual.

Con el calor se puede producir un síncope térmico, una deshidratación, una hipertermia o un golpe de calor con graves consecuencias. De nuevo existen diferentes estrategias para actuar frente al estrés térmico: sobre las fuentes, sobre el medio o sobre el receptor.

➤ ***Sobre la fuente:***

- Realizar un buen diseño de los equipos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

➤ ***Sobre el medio:***

- Acondicionamiento del aire.
- Ventilación de las áreas.

➤ ***Sobre el receptor:***

- Limitación de la exposición con alternancia de trabajo y reposo.
- Entrenamiento adecuado.
- Control médico.
- Uso de protecciones individuales.

14.4.- Riesgo de explosión e incendio.

Una explosión es un fenómeno originado por un súbito cambio físico o químico en el estado de una masa que produce una gran liberación de energía y un aumento de volumen en un medio o recipiente que opone resistencia a dicha expansión.

Su efecto es siempre una rotura violenta del recipiente y, como resultado de ésta la proyección al exterior de los trozos de material del recipiente destruido, con el consiguiente riesgo directo para las personas, e indirectamente por impacto en otros equipos (incendio, explosión o destrucción). Además la salida al exterior de la sustancia contenida, lo que a su vez implica diversos riesgos asociados a su naturaleza o a su estado físico (quemaduras en personas y fuente de calor para combustibles cercanos, explosión química, etc.).

En la línea de proceso del presente proyecto existe riesgo de incendio y explosión, ya que se trabaja con productos inflamables y que además se encuentran en ciertas zonas a alta presión y temperatura.

Las principales medidas preventivas a adoptar para evitar estos riesgos son:

- Instalar elementos para controlar las diferentes variables que aseguren el correcto funcionamiento de los equipos reduciendo el riesgo de explosión. Así, en la medida de lo posible, se evita la presencia de atmósferas explosivas.

Esto se hará con los convenientes sistemas de seguridad presentes en la planta como: controladores y reguladores de presión y temperatura, respiraderos de tanque, válvulas de desahogo de presión de seguridad o discos de rupturas.

- Situar las unidades de operación a la distancia de seguridad apropiada entre ellas. En el **apartado 6.3 del Anexo 6** de la presente Memoria se define la posición de los equipos entre sí en la planta atendiendo unas restricciones particulares dadas por la bibliografía (Durand A.; 1998) y respetando el resto de equipos que se encontrasen situados en la planta.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En la eventualidad de que, a pesar de las medidas de prevención acogidas, se produzca alguna explosión, han de tomarse ciertas medidas de protección para reducir las consecuencias.

— En caso de derrame o fuga de los líquidos del proceso, se eliminará toda fuente de ignición y se procederá a recoger en la medida de lo posible el líquido derramado, introduciéndolo en recipientes herméticos. El sobrante se recogerá con un absorbente inerte como arena para proceder a su traslado a lugar seguro.

— En caso de generarse fuego, se dispondrán elementos que eviten la propagación horizontal de este. Los equipos de almacenamiento estarán provistos de un cubeto de retención.

— Se dispondrán de señales acústicas y luminosas que alerten a los trabajadores de un posible riesgo de explosión, para que se proceda a su evacuación hasta lugar seguro proporcionando salidas de emergencias que permitan desalojar la zona afectada en condiciones de seguridad con el mínimo riesgo. Para ello se definirá un plan de emergencia y evacuación.

En el caso de que se produzca un incendio se emplearán los siguientes sistemas de seguridad y confinamiento industriales:

- Extintores: Serán distribuidos a lo largo de la planta de forma que desde cualquier punto de origen de evacuación hasta un extintor no existan más de 15 metros de distancia. Estarán colocados a 1.7 metros de altura sobre el suelo como máximo.
- Pulsadores de alarma de incendios: se dispondrá de un pulsador junto a cada salida del área de incendios y a la distancia máxima de 25 metros.
- Sistema de alarmas: la señal acústica transmitida debe ser claramente diferenciable para casos de emergencia parcial o general. Se usará un sistema de megafonía.
- Sistema de hidrantes contraincendios: Se localizarán de forma que la zona protegida por cada una sea la cubierta en un radio de 40 metros, medidos horizontalmente desde el emplazamiento de la misma.

14.5.- Riesgo eléctrico.

El riesgo eléctrico se define como la posibilidad de circulación de una corriente eléctrica a través del cuerpo humano. Aunque el número registrado de accidentes eléctricos es muy reducido, es necesario el tratamiento íntegro del problema ya que estos suelen ser muy graves o mortales.

Los efectos patológicos que la corriente eléctrica ejerce sobre el cuerpo humano son diversos. La corriente eléctrica puede alterar los estímulos nerviosos que rigen el funcionamiento de los distintos órganos y aparatos del cuerpo, produciendo contracciones involuntarias de los músculos que pueden afectar muy negativamente a funciones vitales como la respiración o el ritmo cardíaco. Además, la circulación de corriente a través del cuerpo humano produce, como en todo soporte material, un desprendimiento de calor que puede generar quemaduras profundas que pueden llevar hasta incluso la carbonización de los tejidos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En el caso específico de la corriente continua, puede producirse también la electrolisis de los fluidos corporales, en especial de la sangre, provocando la aparición de burbujas gaseosas en los vasos sanguíneos desembocando en una embolia al individuo.

Para minimizar la exposición a este riesgo se adoptan las siguientes medidas preventivas:

— Las subestaciones eléctricas se declararán zonas restringidas y serán cerradas a toda persona no implicada en las tareas. Las zonas de prueba de bombas, motores y otros equipos donde sea factible establecer un área restringida, se vallarán y señalizarán para notificar sobre la realización de pruebas e impedir la entrada de personal ajeno.

— Todos los equipos y elementos que estén o hayan estado en tensión deberán desconectarse antes de realizar ningún trabajo sobre ellos, comprobándose además, la ausencia de tensión.

— Las partes activas de los equipos, herramientas y máquinas se encontrarán eléctricamente aislados.

— Se dispondrán de elementos de seguridad tales como diferenciales de intensidad o magneto-térmicos que permitan cortar el suministro de la corriente en caso de que aumente de forma elevada la intensidad de corriente que circula por el sistema.

— Todos los circuitos eléctricos tendrán instalada una toma de tierra.

14.6.- Riesgo de almacenamiento.

En el presente Proyecto no se ha diseñado ningún tanque de almacenamiento debido a que se trata de una unidad intermedia de una línea de proceso de la refinería. No obstante, se exponen brevemente los riesgos generales asociados al almacenamiento de productos químicos.

De forma genérica los riesgos potenciales que se pueden dar son los siguientes:

- Explosión.
- Incendio.
- Liberación de vapores tóxicos.
- Derrames de producto.
- Reacciones violentas.

Como consecuencia se pueden producir lesiones personales como quemaduras, traumatismos, intoxicaciones y hasta asfixia. Además se ha de tener en cuenta los daños materiales a instalaciones y productos; y, la contaminación ambiental que se puede dar por fugas o derrames.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Es necesario el diseño de una infraestructura adecuada para disminuir este riesgo.

— El tanque de almacenamiento se encontrará situado en un área diseñada para esto, separada de los equipos de procesos. Esta área posee un fácil acceso para el transporte y los servicios de emergencia.

— Además, el tanque poseerá un cubeto de retención propio diseñado con las medidas necesarias para asegurar un control del derrame correcto.

— El diseño del tanque provee a este de elementos de medida, control y alivio de presiones como medida de prevención.

— Se dispondrá de señalización normalizada en el almacenamiento y en las conducciones de la planta, donde se indica con claridad el fluido que circula por su interior.

— La zona de almacenamiento estará convenientemente iluminada.

14.7.- Protecciones personales.

En toda industria lo principal es eliminar el riesgo mediante el estudio del puesto de trabajo, con resguardos o dispositivos de seguridad con las medidas propuestas anteriormente, es decir, con medidas colectivas. Pero, complementariamente, se deben utilizar equipos de protección para los empleados. Estos pueden ser individuales o globales.

14.7.1.- Equipos de protección individual (EPI).

Se entiende por equipo de protección individual según el Real Decreto 773/97 “cualquier equipo destinado a ser llevado o sujeto por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar a su seguridad o salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin”.

Los EPI que deberán ser utilizados en la planta de procesos diseñada en el presente proyecto son:

— Casco de protección.

— Protección del oído. Para elegir el EPI adecuado hay que evaluar el nivel de riesgo, en concreto los valores de pico y la dosis equivalente de ruido recibida para evitar dificultades de comunicación al trabajador. Las opciones son tapones internos (atenúan 8 dB), las orejeras (15 dB) o los cascos antiruidos (20 dB).

— Protectores oculares (gafas) con protección lateral.

— Pantallas faciales para trabajos específicos.

— Equipos respiratorios autónomos en casos especiales como la manipulación de las unidades que contengan agentes tóxicos o en las fugas de producto.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Calzado especial anti pinchazos, golpes, aplastamientos, quemaduras, deslizamientos, agresivos químicos o electricidad.

— Ropas de protección especiales en caso de temperatura excesivamente alta o baja.

— Prendas de señalización: cinturones, brazaletes, chalecos. Se usan en ambientes de escasa visibilidad para evitar colisiones y atropellos.

14.7.2.- Equipos de protección colectiva.

Son medidas de protección para el colectivo de trabajadores. Algunos ejemplos son vallas de limitación y protección, andamios y cables para sujeción del cinturón de seguridad, pasarelas, señales de seguridad, casetas de protección contra intemperie, protecciones de máquinas cortadoras, interruptores diferenciales, toma de tierra o protecciones magnetotérmicas.

14.8.- Señalización de seguridad.

La señalización de seguridad facilita información de una forma sencilla para una gran población a un coste muy rentable. Sólo requiere que sea correctamente proyectada e instalada.

En el Real Decreto 485/1997 se define la señalización como: “la técnica de prevención que pretende, mediante estímulos sensoriales, condicionar la actuación de la persona que los recibe, frente a riesgos o peligros que desean ser resaltados para que sean eludidos”.

A continuación se definen las señalizaciones de seguridad que se implantarán en la zona de proceso diseñada en el presente proyecto.

14.8.1. Paneles visuales.

Estas señales, por la combinación de las formas geométricas, los colores y los símbolos o pictogramas, proporcionan una determinada información, cuya visibilidad está asegurada por una iluminación de suficiente intensidad.

En determinados lugares de la planta de proceso diseñada se mostraran los siguientes paneles:

✓ *Señales de advertencia.*

Tienen forma triangular con pictograma negro sobre fondo amarillo. Aparecerán en ciertas áreas de la planta de proceso y presentan advertencias de ciertos riesgos mencionados anteriormente en este capítulo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.



Figura 35.-Paneles de advertencia presentes en la planta

✓ **Señales de prohibición.**

Tienen forma redonda con el pictograma negro sobre fondo blanco, bordes y banda rojos. En este caso todas las señales de prohibición son genéricas de la planta y no del proceso que se diseña en el presente proyecto, como no fumar, prohibido el paso a peatones, etc.

✓ **Señales de obligación.**

Presentan forma redonda con el pictograma blanco sobre fondo azul. En la planta se encontrarán los siguientes paneles.



Figura 36.-Paneles de obligación presentes en la planta

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Señales relativas a los equipos de lucha contra incendios.**

Tienen forma rectangular o cuadrada con el pictograma blanco sobre fondo rojo. Se encuentran distribuidas por la planta para indicar las posiciones de los equipos antincendios.



Figura 37.-Paneles de señalización de los equipos contra incendios

✓ **Señales de salvamento o socorro.**

Presentan forma rectangular o cuadrada con pictograma blanco sobre fondo verde. Se encuentran distribuidas por la planta para mostrar las salidas de emergencia, los teléfonos de salvamento y las estaciones de primeros auxilios.



Figura 38.-Paneles de señalización de salvamento o socorro

14.8.2.- Alumbrado.

Es necesaria una iluminación adecuada de la planta para disminuir las probabilidades de accidente. Se presentan dos tipos de alumbrado: el interior y el de emergencia.

✓ **Alumbrado interior.**

Se debe usar la luz natural predominantemente, y cuando ésta no sea suficiente completar con luz artificial. La iluminación de cada zona área de trabajo deberá adaptarse a las actividades que se lleven a cabo en ella, teniendo en cuenta los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores dependientes de las condiciones de visibilidad y las exigencias visuales de las tareas desarrolladas.

Su distribución deberá ser uniforme manteniendo niveles y contrastes adecuados para no deformar la profundidad o distancia entre objetos en la zona de trabajo. Se evitarán los deslumbramientos tanto directos como indirectos producidos por zonas reflectantes.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ ***Alumbrado de emergencia.***

Este sistema de alumbrado de emergencia actuará automáticamente cuando falle el alumbrado general. Debe tener una potencia mínima de $0,5 \text{ W/m}^2$ y cumplir las funciones de alumbrado ambiental, de circulación y de reconocimiento de obstáculos por una hora. Se colocará una luz de emergencia junto a cada extintor como en cada salida.

14.8.3. Señalización acústica.

Es una señal sonora codificada, emitida y difundida por medio de un dispositivo adecuado, y sin intervención de voz humana o sintética que se utiliza en casos en los que la señalización óptica no ofrece garantía total o como refuerzo de la misma.

Para que sean efectivas deben provocar la respuesta esperada de forma inmediata, por lo tanto debe ser conocida por el personal, no debe confundirse y no debe enmascarse con el ruido ambiente.

Las señales acústicas que se utilizan normalmente son:

- Alerta: indica la presencia de un peligro.
- Evacuación de urgencia (independiente del tipo de riesgo).
- Presencia de gases tóxicos.

14.9.-Gestión de seguridad.

Se presenta un Plan de Emergencia Interno (PEI) en para la planta. El PEI es un instrumento técnico constituido por documentos donde se contempla la organización del conjunto de medios y procedimientos de actuación previstos en el interior de un establecimiento industrial o en establecimientos próximos con el fin de garantizar la fiabilidad de los medios de protección y la toma de decisiones correctas para contener y controlar los accidentes graves o cualquier suceso incontrolado que por su naturaleza pueda inducirlos, limitando las consecuencias para las personas, bienes o medio ambiente.

En un PEI es necesario resaltar la importancia de una correcta asignación de responsabilidades especificando la cadena de mando. En efecto, el Director del mismo debe ser consultado en todas las situaciones que involucran aspectos de seguridad, quien tras evaluar la gravedad de la incidencia, debe decidir el tipo de emergencia iniciando en su caso el plan de emergencia con las comunicaciones necesarias y acciones requeridas de los equipos de emergencia especialmente organizados y entrenados para actuar si se prevé cierta severidad del daño.

Los datos e información que deben incluirse en el PEI de acuerdo con la mencionada directiva comunitaria, complementados con otros que también se consideran de interés son:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Nombres o cargos de las personas autorizadas para poner en marcha procedimientos de emergencia y persona responsable de aplicar y coordinar in situ las medidas destinadas a paliar los efectos del accidente.

— Nombre o cargo de la persona responsable de la coordinación con la autoridad responsable del plan de emergencia externo.

— Fijar criterios operativos de respuesta en cada circunstancia o acontecimiento que pueda llegar a propiciar un accidente grave, análisis y clasificación de las diferentes posibilidades de emergencia, descripción de las medidas que deberán adoptarse para controlar la circunstancia o acontecimiento y limitar sus consecuencias, incluida una descripción del equipo de seguridad y los recursos disponibles.

— Medidas para limitar los riesgos para las personas in situ, incluido el sistema de alerta y el comportamiento que se espera de las personas una vez desencadenada.

— Medidas para alertar rápidamente del incidente a la autoridad responsable de poner en marcha el plan de emergencia externo, el tipo de información que deberá facilitarse de inmediato y medidas para facilitar información más detallada a medida que se disponga de la misma.

— Medidas de formación del personal en las tareas que se espera que cumplan para que el PEI sea operativo y, en su caso, de coordinación con los servicios de emergencia exteriores.

— Medidas para prestar, asistencia a las operaciones paliativas externas. Aquí hay que prever además el restablecimiento de las condiciones medioambientales y la limpieza del lugar tras el accidente.

— Plano de situación y emplazamiento de las instalaciones por sectores y/o plantas con escalas y formatos adecuados.

— Prever la realización de simulacros para mantener actualizado el plan

— Criterios para su mantenimiento y revisión.

— Pactos de ayuda mutua para generar recursos, entre las empresas e instituciones de la zona durante la emergencia en aquellos casos que puedan requerir ayuda externa para combatirlos.

En conclusión, se puede pensar en el PEI como un instrumento vivo generador de una cultura preventiva que presenta un cierto grado de flexibilidad para permitir el ajuste del plan con el marco real de cada una de las emergencias que puedan afectar al establecimiento tratando de optimizar el aprovechamiento de los recursos humanos y los medios de prevención disponibles.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPITULO 15. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL.

15.1. Introducción.

La instalación de una planta química produce un impacto importante en el medio, tanto social como ecológico. Por ello, es necesario analizar las posibles consecuencias que se puedan generar desde el punto de vista ambiental a través de una evaluación de impacto ambiental.

El propósito de esta es asegurar que las opciones de desarrollo bajo consideración sean ambientalmente adecuadas y sostenibles, y que toda consecuencia ambiental sea reconocida en el proyecto y tomada en cuenta para el diseño del mismo.

En el presente capítulo se lleva a cabo un análisis de los principales aspectos medioambientales a tratar en la línea de proceso desarrollada desde un punto de vista general.

15.2. Legislación.

La ley 7/2007, del 9 de Julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, es de aplicación a los planes, programas y proyectos de construcción, instalaciones y obras públicas o privadas que se hallen comprendidas entre sus anexos I, II y III, así como a las industrias, actividades y, en general, cualquier dispositivo o actuación susceptible de producir contaminación atmosférica, tanto por formas de materia como de energía, que impliquen molestia grave, riesgo o daño para las personas o bienes de cualquier naturaleza.

Por lo tanto, se declara que la planta proyectada está incluida en las actuaciones de dicha Ley.

El objetivo de la presente ley es:

— Prevenir, minimizar, corregir o, en su caso, impedir los efectos que determinadas actuaciones públicas o privadas puedan tener sobre el medio ambiente y la calidad de vida, a través de las medidas que se establecen en la misma.

— Definir el marco normativo y de actuación de la Comunidad Autónoma de Andalucía, en materia de protección atmosférica, residuos en general y calidad de las aguas, para conseguir mediante la aplicación de técnicas o instrumentos administrativos de prevención, corrección y control, una mejora de la calidad ambiental, en el ámbito de sus competencias.

Además de esto, el presente Proyecto atiende a la Guía de Mejoras Técnicas Disponibles en España del sector refino de petróleo, emitida por el Ministerio de Medio Ambiente.

15.3. Gestión de residuos generados.

En la línea de proceso diseñada se generan los siguientes residuos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ ***Residuos líquidos.***

No se generan vertidos líquidos directos de las corrientes del proceso. La corriente de cabeza se devuelve a refinería donde se aprovecha para otros procesos. Las corrientes de aceite calefactor retornan de nuevo al circuito cerrado. Se disponen medidas de seguridad para evitar, en su caso, vertidos accidentales que puedan dañar el medio donde se encuentra ubicada la planta.

✓ ***Residuos sólidos.***

No se producen residuos sólidos.

15.4.-Emisiones atmosféricas.

Las emisiones atmosféricas producidas por la línea de proceso diseñada en el presente Proyecto Fin de Carrera pueden ser:

✓ ***Gases y humos.***

El primer impacto y el más importante que la línea de producción provoca es la emisión de humos en el horno.

La chimenea ha de disponer de una altura mínima que evacuará los humos, de manera que su comportamiento medioambiental sea adecuado. En particular, se analiza la posible afección del proyecto sobre la calidad del aire en las zonas habitadas y en los espacios naturales. Se observa que la contribución de esta línea de producción a los niveles de inmisión es escasa, por lo que se puede afirmar la viabilidad del mismo en lo que al impacto atmosférico se refiere.

Los humos provienen del producto de la combustión del gas natural. Estos humos se componen de:

- N₂: Procedente del aire comburente.
- CO₂ y H₂O (vapor): Procedentes de la combustión del gas natural, junto con pequeñas cantidades provenientes de la propia composición del aire comburente.
- O₂: Procedente del aire comburente, en exceso respecto al necesario para una combustión estequiométrica.
- NO_x: Si la temperatura alcanzada por la llama supera los 1300 °C en alguna zona, la combinación del nitrógeno del aire con el oxígeno se realiza a velocidades apreciables, contaminando los humos con óxidos de nitrógeno en proporciones suficientes como para sobrepasar las normativas.
- CO: resultado de una combustión incompleta.

Las propiedades de los humos se asemejan a las del aire ambiente (con un 50% de humedad relativa). La combustión se realiza con exceso del 10% del aire comburente respecto

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

de la proporción estequiométrica. En este caso, con más motivo, las propiedades de los humos se acercan a las del aire. Por estas razones, y a efectos de cálculos técnicos se pueden tomar las del aire como propiedades de los humos de la combustión de gas natural.

Frecuentemente se hace una estimación de la cantidad de aire utilizado en una combustión a través de una determinación en los humos salientes de oxígeno libre, CO_2 y CO , ya sea de forma continua en un punto determinado de la chimenea, ya sea mediante tomas de muestras discontinuas. Si la concentración de O_2 libre es muy baja y se observa un exceso de CO , es evidente que la combustión es deficitaria en comburente.

A partir de la concentración de oxígeno en los humos, puede determinarse el exceso de aire comburente y en consecuencia, las propiedades de los humos.

✓ **Ruido**

De acuerdo con el Real Decreto que establece los límites de exposición de ruido como, 87 dB (A) de “nivel diario equivalente” y 140 dB (C) como pico, y estableciendo distintas mediciones de recomendación y obligación cuando se sobrepasen los valores de 80 y 85 dB (A) y 135 y 137 dB (C), se medirán y calcularán los niveles de ruido en cada una de las zonas de la línea de proceso y se desarrollarán las medidas pertinentes de actuación cuando éstos sean superiores a los establecidos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPÍTULO 16.-BIBLIOGRAFÍA

16.1.-Libros

— Serge Raseev (2003), *“Thermal and Catalytic Processes in Petroleum Refining”*. Ed.Marcel Dekker.

— Chaurette, J. (2003). *“Pump System Analysis and Sizing”*. Fluide Design Inc.

— García Garrido, S. (2003). *“Organización y gestión integral del mantenimiento”*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

— G. Calleja Pardo, F. García Herruzo, A. de Lucas Martínez, D. Prats Rico y J.M. Rodríguez Morat (1999); *“Introducción a la Ingeniería Química”*, Ed. Síntesis.

— O.Levenspiel(1979), *“Ingeniería de las reacciones químicas”*, Ed.Reverté

— Greene, R. W. (1986). *“The Chemical Engineering Guide to Corrosion”*. McGraw Hill.

— Kister, H. Z. (1992). *“Distillation Desing. California”*. Ed. McGraw-Hill Inc.

— Kuppan, T. (2000). *“Heat Exchanger Design Handbook”* . Madras, India: Souther Railway.

— McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). *“Operaciones unitarias en ingeniería química”*. Madrid.

— Smith, Van Ness, Abbott(1996). *“Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química”*. Ed.McGraw-Hill, Quinta Edición, 1996.

— Bruce E.Poling, John M.Prausnitz, John P. O’Connell(2001). *“The Properties of Gases and Liquids”*. Ed.McGraw-Hill.

— McKetta, J. J. (1992). *“Heat Transfer Design Methods”*.

— Jorge Ancheyta (2011), *“Modelling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining”*, Ed.Wiley.

— Moss, D. R. (2004). *“Pressure Vessel Design Manual”*. Gulf Profesional Publishing.

— Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2001). *“Manual del Ingeniero Químico”*. Mc Graw Hill.

— Storch de Gracia, J. (1998). *“Manual de Seguridad Industrial en plantas Químicas”*. Madrid: McGraw-Hill.

— Treybal, R. E. (1981). *“Operaciones de Transferencia de Masa”*.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Megyesy, E.F (1992). *“Manual de Recipientes a Presión. Diseño y Cálculo”*. Ed. Limusa

— Walas, S. M. (1988). *“Chemical Process Equipment. Selection and Design”*

— Sami Matar, Lewis F. Hatch (2000). *“Chemistry of Petrochemical Processes”*. Gulf Publishing Company, Second Edition.

— Kayode Coker (2011). *“Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design”*, Gulf Publishing Company

— J.P.Wauquier (1993). *“El Refino del Petróleo”*, Ed. Díaz de Santos.

16.2.-Artículos

— F. Jiménez, V. Kafarov, M. Núñez (2007). *“Modelling of industrial reactor for hydrotreating of vacuum gas oils simultaneous hydrodesulfurization, hydrodenitrogenation and hydrodearomatization reactions”*. *Chemical engineering Journal* 134, 200-208.

— Aysar T.Jarullah, Iqbal M.Mujtaba, Alastair S.Wood (2011). *“Kinetic parameter estimation and simulation of trickle-bed reactor for hydrodesulfurization of crude oil”*. *Chemical Engineering Science* 66, 859-871.

— Glinos, K.N. and Malone, M.F. (1985). *“Design of Sidestream Distillation Columns”*. *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.* 24, 822-828.

— Vrinat, M.L. (1983), *Applied Catalysis* 6, 137

— Alvarez, A., Ancheyta, J. (2008), *Applied Catalysis A: General* 351, 148-158.

— Bhaskar, M., Valavarasu, G., Sairam, B., Balaraman, K.S., Balu, K. (2004), *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43, 6654-6669.

— Girgis, M.J., Gates, B.C. (1991). *Industrial & Engineering Chemistry Research* 30(9), 2021-2058

— Alejandro Anaya Durand (1998). *“Implantación de equipos en plantas petroquímicas. Recomendaciones para el diseño del plot-plan”*. *Ingeniería Química, Instituto Mexicano del Petróleo*.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

16.3.-Webs

- www.aspentech.com
- www.cepsa.com
- <http://www.lookchem.com>
- www.rua.ua.es
- www.insht.es
- <http://completewatersystems.com>
- <http://disenodeplantasquimicas.blogspot.com>
- <http://www.monografias.com>
- <http://www.matbase.com/>
- www.scribd.com
- www.valvias.com
- www.directindustry.com
- www.atlascopco.es
- www.gouldspumps.com
- www.aenor.es
- www.prtr-es.es

16.4.-Programas Informáticos

- Microsoft Word 2010.
- Microsoft Excel 2010.
- AutoCad 2015 (Student Edition)
- Aspen HYSYS V8.4.

Documento I:

Anexos a la

MEMORIA.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

ANEXO 1.DISEÑO DEL REACTOR QUÍMICO	9
1.-Introducción	9
1.1.-Reacciones químicas	9
1.2.- Caudales de entrada y salida	10
1.3.- Condiciones de operación.....	10
1.4.- Cinética de la reacción	11
1.5.- Estimación de las propiedades físico-químicas.....	12
1.5.1. -Características del lecho catalítico.....	14
1.5.2.- Estimación de parámetros cinéticos	16
1.6.- Tipo de reactor.....	17
1.6 .1.- Catalizadores y características	18
1.6 .2.- Etapas del proceso	19
1.6.3.- Reactores heterogéneos	21
1.7.- Obtención de las ecuaciones de diseño del reactor	24
1.7.1.-Clasificación de los modelos para reactores de lecho fijo:	25
1.7.2.-Modelo elegido para el diseño	26
1.7.3.- Desarrollo del modelo y particularización para la reacción de HDS	27
1.7.4.- Cómo abordar la ecuación para realizar un correcto diseño.....	29
1.7.5.-Efecto de la caída de presión en reactores de lecho fijo	31
1.8.- Asignación de los flujos	33
1.9.-Determinación del perfil de concentraciones y longitud de los tubos	33
1.10.-Obtención del volumen del reactor	37
1.11.- Dimensiones del reactor	38
1.12. -Diseño mecánico	40
1.12.1E.-spesor de los tubos	40
1.12.2.-Espesor de la carcasa	43
1.13.- Pérdidas de carga	45
1.13.1.-Pérdida de carga por rozamiento con la pared de la tubería	45
1.13.2.-Cálculo del factor de fricción	47
1.13.3.-Cálculo del diámetro equivalente	47
1.13.4.-Pérdida de carga total.....	48
1.14.- Diámetro del haz y número de tubos. Relación L/D del sistema de reacción.	48

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.15.-Deflectores o baffles	49
1.15.1.- Espaciamiento entre deflectores	50
1.15.2.-Número de deflectores	50
1.15.3.-Espesor de los deflectores	51
1.15.4.-Diámetro de los deflectores.....	51
1.16.-Aislamiento	51
1.17.- Balance de energía del sistema.....	52
1.18.-Calor intercambiado y caudal de agua.....	54
1.19.-Propiedades de los fluidos	55
1.20.- Diferencia media logarítmica de la temperatura.....	56
1.21.-Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor U.....	57
1.21.1.-Cálculo del coeficiente individual de película interna, h_i	58
1.21.2.-Cálculo del coeficiente individual de película externa, h_o	60
1.21.3.-Factores de incrustación interno $R''_{f,i}$ y externo $R''_{f,o}$	61
1.21.4.- Conductividad térmica del material.....	61
1.22.-Área de intercambio necesaria	62
1.23.-Número de tubos necesarios	63
1.24.-Nomenclatura	64
ANEXO 2. DISEÑO DEL HORNO DE PROCESOS	68
2.1.-Introducción	68
2.1.1.-Normativa	68
2.2.-Tipo de horno.....	68
2.3.-Balance de energía.....	70
2.4.-Temperatura de salida de los gases (T_{stack}) y eficiencia del horno	70
2.5.-Calor liberado.....	71
2.6.-Cantidades requeridas de combustible y aire	72
2.6.1.-Cantidad de combustible	72
2.6.2.-Cantidad de aire necesaria para la combustión.....	73
2.6.3.-Relación aire-combustible	74
2.7.-Velocidad del fluido y dimensiones de los tubos.....	74
2.8.-Diseño de la sección de radiación.....	80
2.8.1.-Estimación del flujo de energía radiante	80
2.8.2.-Estimación del calor cedido por la zona radiante	81
2.8.3.-Estimación del área refractaria	81

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.8.4.-Método de Lobo y Evans.....	83
2.9.-Diseño de la sección de convección.....	95
2.9.1.-Diseño de los tubos de choque.....	97
2.9.2.-Diseño de la zona de tubos con aletas.....	107
2.9.3.-Temperatura de la superficie metálica para tubos de choque y aletas.....	113
2.10.-Diseño de la chimenea.....	116
2.10.1.-Pérdidas de presión de la chimenea.....	119
2.11.-Temperaturas del fluido y de los gases de combustión.....	121
ANEXO 3.DISEÑO DE LA COLUMNA DE RECTIFICACIÓN	123
3.1.-Introducción.....	123
3.2.-Diseño de la columna.....	124
3.2.1.-Alimentación de la columna	124
3.2.2.-Balance global de materia.....	124
3.2.3.-Condición de alimentación	125
3.2.4.-Determinación de las etapas mínimas, relación de reflujo y del número de etapas de equilibrio	125
3.2.5.-Número de etapas reales.....	133
3.2.6.-Ejecución del simulador Hysys y datos finales.....	134
3.2.7.-Diseño mecánico de la torre	154
ANEXO4.-EQUIPOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR.....	165
4.1.-Diseño del calderín.....	165
4.1.1.-Introducción.....	165
4.1.2.-Caracterización de las corrientes.....	165
4.1.3.-Selección del tipo de intercambiador	166
4.1.4.-Asignación de flujos	166
4.1.5.-Cálculo del calor intercambiado	166
4.1.6.-Características de los tubos y material empleado	167
4.1.7.-Diferencia de temperatura media logarítmica	167
4.1.8.-Suposición del número de tubos del intercambiador.....	168
4.1.9.-Coeficiente global de intercambio de calor.....	170
4.1.10.-Longitud de los tubos y proceso de iteración	173
4.1.11.-Dimensiones de la carcasa.....	174
4.1.12.-Diseño mecánico.....	174
4.1.13.-Pérdidas de carga.....	178

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.2.-Diseño del intercambiador de calor líquido-líquido ICA	182
4.2.1.-Introducción	182
4.2.2.-Caracterización de las corrientes de entrada	182
4.2.3.-Selección del tipo de intercambiador	183
4.2.4.-Asignación de flujos	183
4.2.5.-Cálculo del calor intercambiado	183
4.2.6.-Características de los tubos y material empleado	184
4.2.7.-Diferencia de temperatura media logarítmica	184
4.2.8.-Suposición del número de tubos del intercambiador.....	185
4.2.9.-Coeficiente global de intercambio de calor	186
4.2.10.-Longitud de los tubos y proceso de iteración	190
4.2.11.-Dimensiones de la carcasa	191
4.2.12.-Deflectores	191
4.2.13.-Diseño mecánico	193
4.2.14.-Pérdidas de carga	196
4.3.-Diseño del condensador total	200
4.3.1.-Introducción	200
4.3.2.-Caracterización de las corrientes de entrada	200
4.3.3.-Selección del tipo de intercambiador	201
4.3.4.-Asignación de flujos	201
4.3.5.-Cálculo del calor intercambiado	201
4.3.6.-Características de los tubos y material empleado	201
4.3.7.-Diferencia de temperatura media logarítmica	203
4.3.8.-Suposición del número de tubos del intercambiador.....	204
4.3.9.-Coeficiente global de intercambio de calor	205
4.3.10.-Número de filas de tubos y proceso de iteración	210
4.3.11.-Características del banco de tubos	211
4.3.12.-Diseño de los ventiladores	212
4.3.13.-Diseño mecánico	216
4.3.14.-Pérdidas de carga	217
ANEXO 5.-ACUMULADOR DE REFLUJO.....	220
5.1.-Introducción	220
5.2.-Caracterización del fluido de operación	220
5.3.-Capacidad del depósito	220

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

5.4.-Dimensiones óptimas del depósito.....	221
5.5.-Fondos del depósito.....	223
5.6.-Espesor.....	224
5.7.-Determinación definitiva de las dimensiones.....	227
5.8.-Aislante	228
ANEXO 6.-DISEÑO DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN	229
6.1.-Introducción	229
6.1.1.- Enumeración de conducciones y tramos	229
6.2.-Diseño mecánico e hidromecánico de tuberías.....	232
6.2.1.-Estimación del diámetro interior de la tubería.....	232
6.2.2.-Obtención del diámetro exterior y nominal	233
6.2.3.-Espesor del termoaislante que cubre las conducciones del tramo	233
6.2.4.-Diseño mecánico de las conducciones.....	233
6.2.5.-Velocidad del fluido real	234
6.2.6.-Desarrollo de los cálculos	234
6.3.-Pérdidas de carga en tuberías.....	245
6.3.1.-Desarrollo de los cálculos	249
ANEXO7.-SISTEMAS DE IMPULSIÓN.....	265
7.1.-Introducción	265
7.2.-Disño de líneas de bombeo de líquidos	265
7.2.1.-Línea 1: bomba de impulsión de la corriente de alimentación al horno	265
7.2.2.-Línea 2: impulsión de la alimentación desde el horno hasta los reactores.....	269
7.2.3.-Línea 3: impulsión del fluido desde la salida de los reactores hasta la unidad de aminas	271
7.2.4.-Línea 4: impulsión de la corriente de producto al plato de alimentación de la columna de destilación.	273
7.2.5.-Línea 2: impulsión de la alimentación del reflujo de la columna	275
7.3.-Disño de líneas de impulsión de gases.....	277
7.3.1.-Criterios de selección de ventiladores, soplantes y compresores.....	277
7.3.2.-Ecuación de diseño para compresores	277
7.3.3.-Desarrollo de los cálculos para el diseño de compresores	280
ANEXO 8.-FIGURAS Y TABLAS.....	283
Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] 283	
Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)	284

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)	285
Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)	286
Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)	287
Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)	288
Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)	289
Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)	290
Tabla A8.2.-Tensiones máximas admisibles para metales (Código ASME, Sección II)	291
Tabla A8.3.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte1	292
Tabla A8.3.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte2	293
Tabla A8.4.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte 1	294
Tabla A8.4.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte 2	295
Tabla A8.5.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte1	296
Tabla A8.5.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte2	297
Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API).....	298
Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-continuación-	299
Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-continuación-	300
Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-continuación-	301
Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-continuación-	302
Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-continuación-	303
Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-continuación-	304
Tabla A8.7.-Eficiencias de juntas máximas permisibles (ASME VIII-Div.I, tabla UW-12)	305
Tabla A8.8.-Factor Y	306
Tabla A8.9.-Características de los tubos de los cambiadores	307
Tabla A8.10.-Número de tubos de los diferentes tipos de intercambiadores (Process Heat Transfer.R.W.Serth).....	308
Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API).....	309
Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-	310
Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-	311
Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-	312
Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-	313

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-	314
Tabla A8.12.-Espesor comercial de deflectores (TEMA, sección5)	315
Tabla A8.13.-Separación máxima entre deflectores (TEMA, sección 5)	316
Tabla A8.14.-Espesores calorifugados de equipos (Cepsa)	317
Tabla A8.15.-Factor de carga por viento (Megyesy, 1992)	318
TablaA8.16.-Factor de forma (Megyesy, 1992).....	318
TablaA8.17.-Coeficiente de factor por ráfagas (Megyesy, 1992).....	318
Tabla A8.18.-Tabla de espesores comerciales para pared de recipientes	318
Tabla A8.19.-Distribución triangular de tubos en intercambiadores de calor	318
TablaA8.20.-Espesores comerciales en aceros	319
Tabla A8.21.-Tabla de espesores de aislante térmico en tuberías	320
Figura A8.1.-Gráfico de Moody	321
Figura A8.2.-Diagrama para determinar la rugosidad relativa en materiales.....	322
FiguraA8.3.-Tensiones de rotura del acero inoxidable 316L a la temperatura de diseño (API 530)	323
Figura A8.4.-Factor de corrosión para tubos de hornos de procesos (API 530)	324
Figura A8.5.-Fracción de absorción de calor en la zona de radiación (DEI.Universidad de Salamanca)	325
Figura A8.6.-Eficiencia aleta como función de la conductividad y el espesor (DEI.Universidad de Salamanca)	326
FiguraA8.7.-Factor Teta para el horno de procesos (DEI.Universidad de Salamanca).....	327
ANEXO 9.-CATÁLOGOS Y	328
FICHAS DE SEGURIDAD.....	328

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ANEXO 1.DISEÑO DEL REACTOR QUÍMICO

1.-Introducción

El propósito del presente anexo es el diseño de los equipos donde se llevará a cabo la reacción de hidrodesulfuración de la corriente de VGO en las condiciones apropiadas.

Nuestro diseño consta de dos reactores RHDS1 y RHDS2, los cuales son reactores catalíticos de lecho fijo a los que llegan dos corrientes procedentes del horno HC donde dos líneas independientes de gasoil por un lado e hidrógeno por otro, fueron calentadas a la temperatura requerida. Estas corrientes llegan al difusor de entrada de cada reactor donde se mezclarán para reaccionar a medida que van atravesando el lecho de catalizador.

La corriente de salida de los equipos de reacción se dirigirá a la línea de separación para obtener los productos y subproductos finales.

Dado que los dos reactores son iguales, se desarrollarán los cálculos para uno de ellos.

1.1.-Reacciones químicas

La desulfuración que tiene lugar en nuestro reactor se produce por hidrogenación catalítica, transformando todo el S presente en H₂S, según las reacciones:

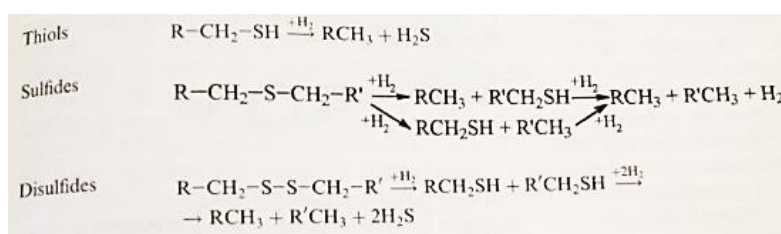


Figura 1.-Reacciones genéticas en reactores HDS

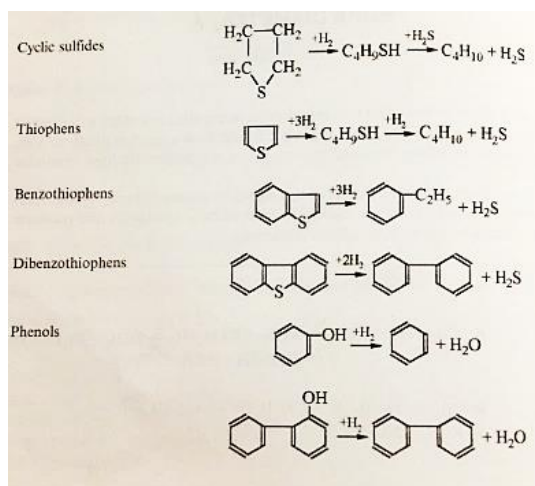


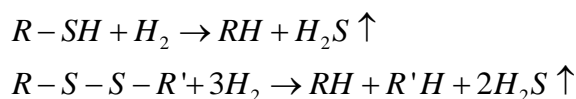
Figura 1.-Reacciones genéricas en reactores HDS (continuación)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

De las reacciones que se presentan en las imágenes Fig.1 y Fig.2 nos interesan aquellas en las que los hidrocarburos contienen azufre. Éstas reacciones han sido tomadas de bibliografía especializada en procesos catalíticos en refinerías (Raseev, S; 2003).

Para llevar a cabo el diseño de nuestro reactor se llevarán a cabo un conjunto de simplificaciones que posteriormente se enumerarán en el correspondiente apartado 1.3 simplificaciones. De momento vamos a hacer mención de las simplificaciones que se refieren a las reacciones que consideramos que se producen en nuestro reactor.

Según la fuente bibliográfica (Jiménez et al; 2007), referida al modelado de reactores trickle-bed para reacciones de hidrodesulfuración y la fuente bibliográfica (Jarullah et al; 2011), referida a la estimación de los parámetros cinéticos de reactores HDS, podemos considerar que el conjunto de reacciones expuesto anteriormente puede reducirse a las siguientes:



1.2.- Caudales de entrada y salida

Se exponen a continuación los caudales que intervendrán durante el diseño del equipo. Se exponen los de un solo reactor ya que el otro es idéntico:

		ENTRADA		SALIDA	
GASOIL		Kg/s	mol/s	Kg/s	mol/s
Aromáticos	Monoaromáticos	0,726	8,642	0,470	4,431
	Diaromáticos	0,594	4,431	0,927	6,022
	Triaromáticos	1,108	6,022	-	-
Cíclicos		5,572	63,317	-	-
Lineales		7,124	19,900	9,552	39,799
TOTAL GASOIL		15,124	102,312	10,949	50,252
AZUFRE		0,796	24,874	0,008	0,249
HIDRÓGENO		0,299	149,250	0,249	124,620
BUTANO		-	-	4,174	71,959
SULFURO DE HIDRÓGENO		-	-	0,837	24,626
TOTAL		16,218	276,436	16,217	271,706

Tabla 1.-Caudales de corrientes que atraviesan uno de los reactores HDS

La tabla superior muestra los caudales que se alimentan a uno de los reactores, debemos tener en cuenta que en nuestro diseño se dispondrán dos reactores idénticos dispuestos en paralelo, por lo que sólo desarrollaremos en este anexo el diseño de uno de ellos para no extendernos más.

Cabe mencionar que además de estos caudales, entrará otro caudal de agua condensado a alta presión que actuará como corriente refrigerante para absorber el calor de reacción, dicho caudal será obtenido en este anexo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.3.- Condiciones de operación

Las condiciones de operación de este proceso se encuentran perfectamente establecidas en un rango de operación estandarizado dado el amplio uso de este tipo de planta de procesos en refinería. Las condiciones que se han elegido para nuestro diseño respetan esos rangos de operación como puede comprobarse en las referencias bibliográficas que han sido citadas hasta el momento, especialmente las de (Jiménez et al; 2007, Jarullah et al; 2011, Raseev; 2003).

Las condiciones fijadas se muestran en la siguiente tabla:

P	[atm]	10
	[bar]	10,13
T	[°C]	320
	[K]	593,15

Tabla 2.-Condiciones de operación en los reactores diseñados

En las condiciones de presión y temperatura en las que tiene lugar la reacción tenemos un sistema trifásico donde el gasoil se encuentra en estado líquido, el hidrógeno en estado gaseoso y el catalizador en estado sólido.

De la literatura estudiada para la elaboración del presente proyecto se extrajeron las siguientes conclusiones:

- ✓ El alto nivel de eliminación de azufre a altas temperaturas es debido a varias razones, tales como la alta eficacia de los compuestos de azufre tiofénico que se encuentra en los cortes pesados del petróleo crudo. Además, el aumento de la temperatura aumenta la energía de activación que conduce a aumentar el número de partículas de azufre interactuando.
- ✓ Las altas temperaturas aumenta la ósmosis en los poros de catalizador en los sitios activos donde se producen las reacciones de hidrodesulfuración, debido a la baja viscosidad. El aumento de la absorción de azufre por la disminución en LHSV es atribuible a un aumento del tiempo de contacto (tiempo de residencia) entre las moléculas de los reactivos y el catalizador, y proporcionan el tiempo suficiente para el proceso de reacción. La razón para el aumento en la eliminación de azufre mediante el aumento de la presión de hidrógeno se atribuye al contacto entre el hidrógeno, los hidrocarburos y el catalizador.

1.4.- Cinética de la reacción

La reacción principal que se produce en el reactor y en la que se centra el interés de nuestro proyecto presenta una característica tan importante será determinante a la hora de seleccionar el tipo final de reactor: es una reacción fuertemente exotérmica.

Para el estudio de la cinética de reacción que nos ocupa nos hemos basado en dos artículos (Jiménez et al; 2007, Jarullah et al; 2010).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Del estudio de estos artículos se puede concluir que desarrollar un modelo cinético para las reacciones de hidrotratamiento del LVGO no es sencillo debido a la compleja composición del mismo. Las impurezas se encuentran en más de una forma, así los compuestos sulfurados pueden hallarse como mercaptanos, tiofenos, benzotiofenos y formas derivadas, así mismo esto sucede con los metales (Marafi et al; 2003). Para una alimentación compleja, podemos agrupar todas las velocidades de reacción en una sola (Labarbidi et al; 1998). Para la mayoría de las reacciones que incluyen el efecto de las especies inhibidoras se emplea el modelo de Langmuir-Hinshelwood.

De acuerdo con Vrinat (1983) y Girgis and Gates (1991), las reacciones de hidrodesulfuración son irreversibles bajo las condiciones generales de operación. Además, las concentraciones de hidrógeno y azufre tienen un impacto positivo en la velocidad de reacción, mientras que el sulfuro de hidrógeno absorbido en las zonas activas del catalizador inhibe la velocidad de reacción. La nomenclatura empleada en las siguientes ecuaciones se explica en el apartado de nomenclatura, al final del presente anexo.

De este modo la reacción de hidrodesulfuración viene descrita por la ecuación cinética obtenida con el modelo de Langmuir-Hinshelwood teniendo en cuenta la influencia de la inhibición por H_2S (Bhaskar et al; 2004; Álvarez and Ancheyta; 2008).

$$r_{HDS} = K_{HDS} \frac{(C_{sul}^S)^n (C_{H_2}^S)^m}{(1 + K_{H_2S} C_{H_2S}^S)^2} \quad [A1.1]$$

Donde la constante cinética tiene la siguiente expresión:

$$K_{HDS} = A_{HDS}^0 \exp\left(-\frac{EA_{HDS}}{RT}\right) \quad [A1.2]$$

1.5.- Estimación de las propiedades físico-químicas

Todas las ecuaciones que hemos visto hasta ahora necesitan de una serie de parámetros que vamos a calcular empleando expresiones tomadas de la bibliografía.

•**Gas-líquido, coeficiente de transferencia de materia:** empleamos una correlación de Rodríguez and Ancheyta, 2004; Mederos et al; 2006)

$$\text{Hidrógeno: } \frac{k_{H_2}^L a_L}{D_{H_2}^L} = 7 \left(\frac{G_L}{\mu_L} \right)^{0.4} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{H_2}^L} \right)^{0.5} \quad [A1.3]$$

$$H_2S: \frac{k_{H_2S}^L a_L}{D_{H_2S}^L} = 7 \left(\frac{G_L}{\mu_L} \right)^{0.4} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{H_2S}^L} \right)^{0.5} \quad [A1.4]$$

$$G_L = \rho_L u_L (\text{flujo másico}) \quad [A1.5]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

• **Líquido-sólido, coeficiente de transferencia de materia:** empleamos la ecuación de Van Krevelen-Krekels publicada por Froment y Brischoff (1990) y Bhaskar et al.2002; Mederos and Ancheyta, 2007:

$$\text{Hidrógeno} : \frac{k_{H_2}^S}{D_{H_2}^L a_S} = 1.8 \left(\frac{G_L}{a_S \mu_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{H_2}^L} \right)^{1/3} \quad [A1.6]$$

$$H_2S : \frac{k_{H_2S}^S}{D_{H_2S}^L a_S} = 1.8 \left(\frac{G_L}{a_S \mu_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{H_2S}^L} \right)^{1/3} \quad [A1.7]$$

$$\text{Azufre} : \frac{k_{Sul}^S}{D_{Sul}^L a_S} = 1.8 \left(\frac{G_L}{a_S \mu_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{H_2S}^L} \right)^{1/3} \quad [A1.8]$$

• **Difusividad molecular:** empleamos la correlación de Tyn-Calus (Raid et al., 1987; Dudukovic et al., 2002):

$$\text{Hidrógeno} : D_{H_2}^L = 8.93 \times 10^{-8} \left(\frac{\nu_L^{0.267} T}{\nu_{H_2}^{0.433} \mu_L} \right) \quad [A1.9]$$

$$H_2S : D_{H_2S}^L = 8.93 \times 10^{-8} \left(\frac{\nu_L^{0.267} T}{\nu_{H_2S}^{0.433} \mu_L} \right) \quad [A1.10]$$

$$\text{Azufre} : D_{Sul}^L = 8.93 \times 10^{-8} \left(\frac{\nu_L^{0.267} T}{\nu_{Sul}^{0.433} \mu_L} \right) \quad [A1.11]$$

• **Volumen molar:** tomamos expresiones de Dudukovic et al, 2002; Macías and Ancheyta, 2004):

$$\text{Crudo} : \nu_L = 0.285 (\nu_c^L)^{1.048} \quad [A1.12]$$

$$\text{Hidrógeno} : \nu_{H_2} = 0.285 (\nu_c^{H_2})^{1.048} \quad [A1.13]$$

$$H_2S : \nu_{H_2S} = 0.285 (\nu_c^{H_2S})^{1.048} \quad [A1.14]$$

• **Volumen específico crítico:** para determinarlo empleamos la correlación de Riazi – Daubert (Ahmed, 1989; Macías and Ancheyta, 2004):

$$\nu_c^L = \left(7.5214 \times 10^{-3} (T_{meABP})^{0.2896} (\rho_{15.6})^{-0.7666} \right) M_w \quad [A1.15]$$

• **Coeficiente de Henry:** podemos calcular los coeficientes de Henry a través de los coeficientes de solubilidad (mederos and Ancheyta, 2007; Álvarez and Ancheyta, 2008):

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$\text{Hidrógeno} : h_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{\lambda_{H_2} \rho_L} \quad [A1.16]$$

$$H_2S : h_{H_2S} = \frac{V_{H_2S}}{\lambda_{H_2S} \rho_L} \quad [A1.17]$$

•**Coefficiente de solubilidad:** Korsten y Hoffmann (1996) presentan las siguientes ecuaciones para la estimación de los coeficientes de solubilidad:

$$\text{Hidrógeno} : \lambda_{H_2} = -0.559729 - 0.42947 \times 10^{-3} T + 3.07539 \times 10^{-3} \left(\frac{T}{\rho_{20}} \right) + 1.94593 \times 10^{-6} T^2 + \left(\frac{0.835783}{\rho_{20}^2} \right) \quad [A1.18]$$

$$H_2S : \lambda_{H_2S} = \exp(3.367 - 0.00847T) \quad [A1.19]$$

•**Densidad del gasoil:** la densidad del gasoil como función de la temperatura y de la presión puede calcularse empleando la ecuación de Standing-Katz, publicado en Ahmed, 1989; Macías and Ancheyta, 2004):

$$\rho_L = \rho_0 + \Delta\rho_P - \Delta\rho_T \quad [A1.20]$$

$$\Delta\rho_P = \left[0.167 + 16.181 \times 10^{-0.0425} \rho_0 \right] \left[\frac{P}{1000} \right] - 0.01 \left[0.299 + 263 \times 10^{-0.0603} \rho_0 \right] \left[\frac{P}{1000} \right]^2 \quad [A1.21]$$

$$\Delta\rho_T = \left[0.0133 + 152.4 (\rho_0 + \Delta\rho_P)^{-2.45} \right] (T - 520) - \left[8.1 \times 10^{-6} - 0.0622 \times 10^{-0.764(\rho_0 + \Delta\rho_P)} \right] (T - 520)^2 \quad [A1.22]$$

•**Viscosidad del gasoil:** usamos la ecuación de Glaso (Ahmed, 1989; Korsten and Hoffmann, 1996; Shokri and Zarrinpashre, 2006):

$$\mu_L = 3.141 \times 10^{10} (T - 460)^{-3.444} \left[\log_{10}(API) \right]^a \quad [A1.23]$$

$$a = 10.313 \left[\log_{10}(T - 460) \right] - 36.447 \quad [A1.24]$$

$$API = \frac{141.5}{sp. gr. 15.6} \quad [A1.25]$$

Además de las propiedades químico-físicas de los reactivos es de interés en este caso la determinación de las características del lecho catalítico ya que este es necesario para que tenga lugar el proceso reactivo bajo estudio. Así pues nos disponemos a abrir un nuevo subapartado que se dedicará a ello.

1.5.1. -Características del lecho catalítico

El catalizador empleado en la reacción de interés es el catalizador de modelo comercial de cobalto-molibdeno soportado sobre alúmina (Co-Mo/γ-Al₂O₃).

El área superficial de las partículas por unidad de volumen del lecho se expresa como (Shah, 1979; Froment and Bischoff, 1990):

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$a_s = \frac{A_c (1 - \varepsilon)}{v} \quad [\text{A1.26}]$$

Particularizando esta ecuación para una partícula de geometría cilíndrica tenemos:

$$a_s = \frac{2\pi r L}{\pi r^2 L} (1 - \varepsilon) = \frac{4(1 - \varepsilon)}{d} \quad [\text{A1.27}]$$

La porosidad del lecho la calculamos con la expresión (Froment and Bischoff, 1990; Macías and Ancheyta, 2004):

$$\varepsilon = 0.38 + 0.073 \left[1 + \frac{((D_R/d_s) - 2)^2}{(D_R/d_s)^2} \right] \quad [\text{A1.28}]$$

Donde d_s toma el siguiente valor para el caso de partículas cilíndricas:

$$d_s = \left[d_c L_c + \left(\frac{d_c^2}{2} \right) \right]^{1/2} \quad [\text{A1.29}]$$

•**Factor de eficacia:** las limitaciones de difusión interna suelen expresarse en términos de factor de eficacia (Satterfield, 1975). Se aprecia que la velocidad de reacción disminuye cuando aumenta el tamaño de la partícula. En la literatura encontramos valores de factor de eficacia en un rango de 0.0057-1 (Scamangas and Marangozis, 1982; Li et al., 1995). Dado que el tamaño de partícula es pequeño, el factor de eficacia puede determinarse por medio del módulo de Thiele (Marroquín et al., 2005). La expresión general del módulo de Thiele para reacciones irreversibles de orden n es (Froment and Bischoff, 1990).

$$\phi = \frac{V_p}{S_p} \left[\left(\frac{n+1}{2} \right) \left(\frac{k C_{A_s}^{n-1} \rho_p}{D_e} \right) \right] \quad [\text{A1.30}]$$

$$\rho_p = \frac{\rho_B}{1 - \varepsilon} \quad [\text{A1.31}]$$

En concreto, para la reacción de HDS nos queda como:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$\phi_{Sul} = \frac{V_p}{S_p} \left[\left(\frac{n+1}{2} \right) \left(\frac{k_{HDS} C_{Sul}^{s(n-1)} \rho_p}{D_e^{Sul}} \right) \right]^{0.5} \quad [A1.32]$$

$$D_e^{Sul} = \frac{\theta}{\tau} \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{D_{sul}^L} \right) + \left(\frac{1}{D_k} \right)} \right) \quad [A1.33]$$

El factor de tortuosidad toma valores entre 2-7 (Satterfield, 1975). Generalmente toma valores de 4 según la bibliografía (Satterfield, 1975; Macías and Ancheyta, 2004; Marroquín et al. 2005). La difusividad de Knudsen se evalúa según (Carberry, 1976; Froment and Bischoff, 1990).

$$D_k = 9700 r_g \left(\frac{T}{M_w} \right)^{0.5} \quad [A1.34]$$

$$r_g = \frac{2\theta}{S_g \rho_p} \quad [A1.35]$$

$$\theta = \rho_p V_g \quad [A1.36]$$

Para calcular el factor de eficacia se emplea la ecuación (Aris, 1975; Li et al. 1995; Chang et al., 1998):

$$\eta_{HDS} = \frac{\tanh \phi_{sul}}{\phi_{sul}} \quad [A1.37]$$

1.5.2.- Estimación de parámetros cinéticos

Las regresiones no lineales (NLN) son modelos de aproximación (ajustes) muy empleados para evaluar parámetros cinéticos. Para el proceso HDS, los métodos de Levenberg-Mardquart y SQP (Successive Quadratic Programming) son especialmente adecuados (Tsamatsoulis and Papayannakos, 1998; Marroquin et al., 2005; Sánchez et al. 2005; Trejo and Ancheyta, 2005; Resendiz et al. 2007; Álvarez and Ancheyta, 2008). Se toman de la bibliografía indicada los siguientes datos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

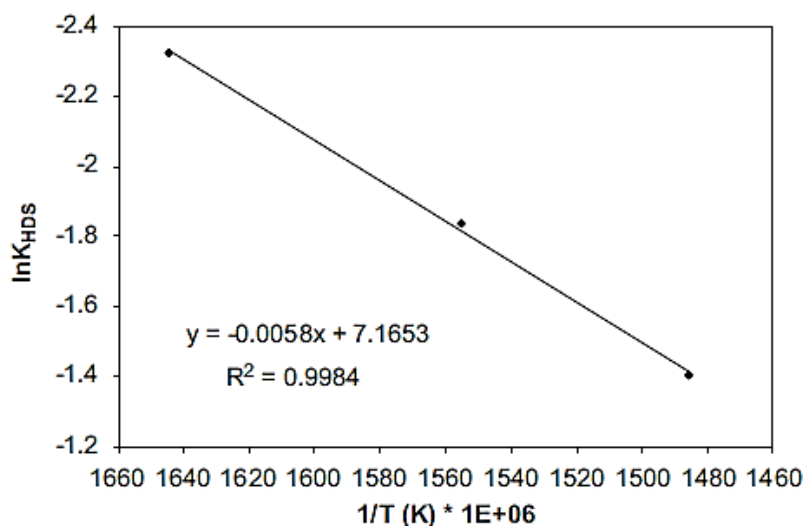


Figura 3.-Representación lineal de la ecuación de Arrhenius para la cinética estudiada

Kinetic parameter values estimated with linear and non-linear approaches.

K_{HDS}^i	m	n	EA_{HDS}	A_{HDS}^0	SSE
<i>First approach (linear)</i>					
0.09797 ($i=1$)					
0.15934 ($i=2$)	0.4656	1.149	48,010.02	1293.75	0.000895
0.24584 ($i=3$)					
<i>Second approach (non-linear)</i>					
	m	n	EA_{HDS}	A_{HDS}^0	SSE
	0.4709	1.147	50,264.10	2026.23	0.000819

Tabla 4.-Parámetros cinéticos estimados

1.6.- Tipo de reactor

La característica principal que tiene la reacción que ocupa este estudio es que es exotérmica y libera calor, de modo que la temperatura en el reactor aumentaría hasta superar temperaturas que han de evitarse para que no se produzca coquización en el reactor. Para evitar esto procederemos a refrigerar el sistema para mantener una temperatura constante en el reactor, manteniendo así nuestro sistema de reacción en condiciones isotérmicas.

Igual de importante es el hecho de que es una reacción catalítica por lo que se hace imprescindible el empleo del catalizador adecuado para poder llevar a cabo el proceso y que es una reacción heterogénea en la que se ven implicados reactivos en distintas fases.

Tras una lectura de los puntos que se exponen a continuación se concluye que con el fin de cumplir este propósito hemos decidido emplear un reactor multitubular, que se diseñará como un intercambiador de carcasa y tubos tipo AET, permitiendo así un mejor control de la temperatura en el que se usará agua como fluido refrigerante. Así, nuestra decisión a la hora

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

de elegir este tipo de reactor ha venido marcada tanto por consideraciones propias como de la lectura de fuentes bibliográficas indicadas con detalle en el apartado 1.3.

1.6.1.- Catalizadores y características

Un catalizador es una sustancia que se caracteriza por acelerar la reacción al proporcionar otros posibles mecanismos para la formación de productos.

Para que la catálisis sea eficiente el mecanismo alternativo debe tener una energía de activación en cada etapa catalítica, inferior a la de la reacción no catalizada. Dado que la constante de la velocidad es función de la temperatura: $k = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$; la disminución de la E_a conduce a un aumento de la constante de velocidad para una T dada y, por consiguiente, de la velocidad del proceso catalítico.

→Características de los catalizadores

✓ El catalizador permanece sin cambiar al final del proceso, por lo que puede reutilizarse muchas veces, si bien esto no indica que el material no tome parte en la reacción.

✓ El catalizador no modifica la termodinámica del sistema:

1. No puede hacer viables aquellas reacciones que termodinámicamente no lo sean.
2. La presencia de un catalizador no cambia la posición del equilibrio en una reacción reversible.

✓ A partir del concepto de la energía de activación, el mecanismo de catálisis implica que:

1. La energía de activación disminuye en presencia del material catalítico. El catalizador hace posible un mecanismo alternativo, cada paso del cual tiene menor energía libre de activación que la del proceso no catalizado.
2. El material catalítico ha de regenerarse tras el proceso, esto es, deben de liberarse los centros activos.

✓ El catalizador puede envenenarse, disminuyendo la velocidad de reacción:

1. La vida activa del catalizador debe ser mucho mayor que el tiempo de reacción.
2. Las formas de envenenarse un catalizador son diversas.
3. Interesa conocer los mecanismos capaces de regenerar el catalizador.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ El efecto catalítico es proporcional a la concentración del catalizador y a la superficie específica del mismo. Este último aspecto se fomenta mediante el empleo de partículas muy porosas.

✓ Los catalizadores son específicos para una reacción determinada por lo que son de gran interés para obtener una distribución de productos adecuada en reacciones múltiples.

✓ La catálisis heterogénea es un fenómeno superficial. El número de centros activos y la velocidad de reacción son, en general, proporcionales a la extensión de la superficie catalítica.

✓ Por todo ello, una propiedad física fundamental es el área superficial S_g (área/masa):

1. Las áreas superficiales adecuadas suelen ser mayores de $100\text{m}^2/\text{g}$.
2. Esto requiere materiales porosos con radio de poros pequeños (10 Armstrong – 100 Armstrong).

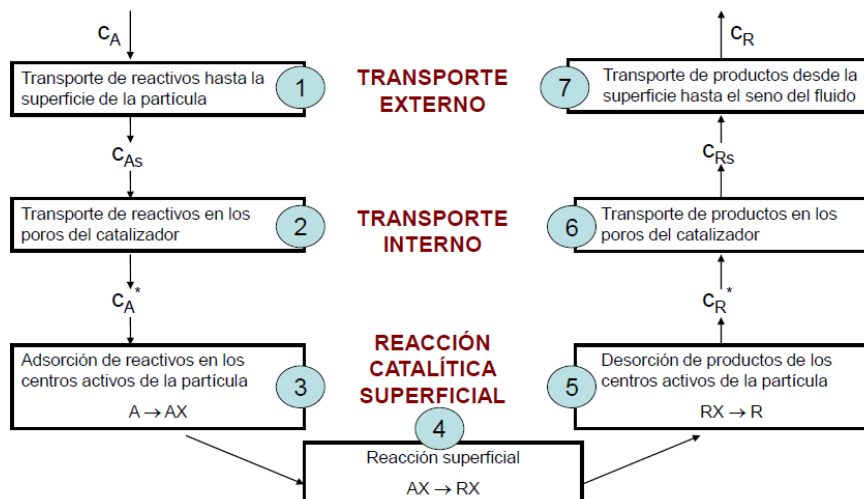
✓ Otras propiedades físicas de interés son:

1. El volumen de espacios vacíos por gramo de partícula, v_g .
2. La densidad del material sólido en la partícula, ρ_s .
3. La distribución de tamaños de poro.

✓ Por consiguiente, cuando se desea preparar un catalizador se promueve la formación de partículas muy porosas.

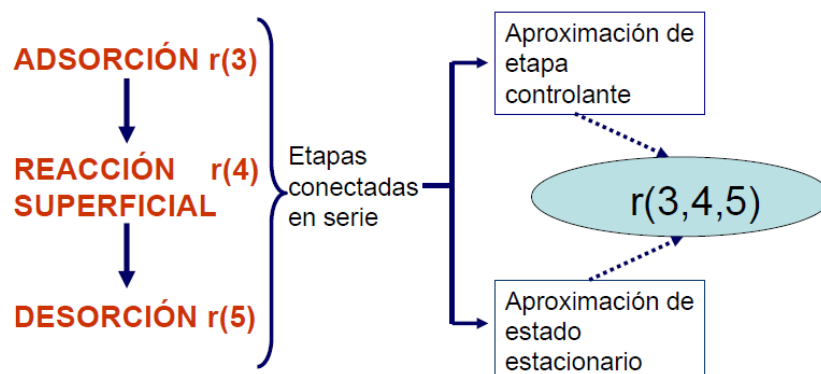
1.6.2.- Etapas del proceso

En este apartado se exponen de modo esquemático las diferentes etapas del proceso de reacción para reactores heterogéneos:

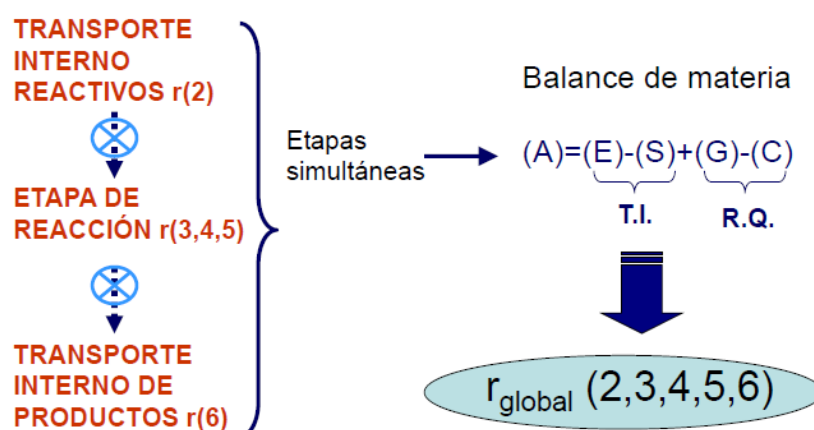


Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

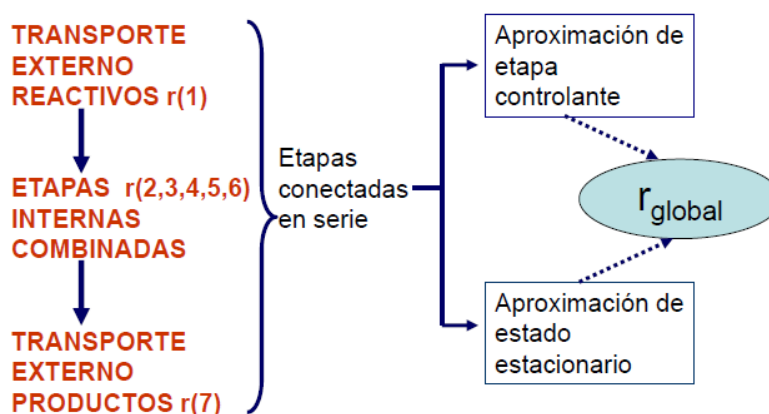
a) Combinación de las etapas químicas:



b) Combinación de la etapa química y el transporte interno:



c) Combinación de las etapas de transporte externo:



Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.6.3.- Reactores heterogéneos

Los reactores catalíticos heterogéneos son la clase más importante dentro de los reactores empleados en la industria química. Si medimos su importancia por el valor de los bienes producidos, la capacidad de procesamiento o la inversión total en los reactores y equipos auxiliares, no hay duda de la importancia de estos reactores en la economía de la sociedad moderna marcada por un fuerte componente tecnológico.

➤ Podemos clasificar los reactores catalíticos heterogéneos de varias formas:

1. Según el movimiento relativo de las partículas catalíticas en su seno:

- a) Reactores en los que las partículas sólidas permanecen en una posición fija relativa unas u otras.
 - Lecho fijo (fixed bed).
 - Lecho de goteo o de escurrido (trickle bed).
 - Reactores de lecho móvil (moving bed reactors).
- b) Reactores en los que las partículas están suspendidas en un fluido y moviéndose continuamente a través de él.
 - Lecho fluidizado (fluidized bed) y reactores de lodos (slurry reactors)

2. Según el número de fases implicadas en el proceso:

- a) Reactores que incluyen el catalizador y una única fase cambiante:
 - Lecho fijo
 - Lecho fluidizado
- b) Reactores en los que intervienen dos fases (gaseosa y líquida) cambiantes, además de la fase sólida catalítica:
 - lechos de goteo
 - reactores de lodo

1.6.3.1.-Características de los reactores de lecho fijo

- ✓ Un reactor de lecho fijo consiste en un tubo cilíndrico lleno de partículas catalíticas (pellets), se denominan también reactores de lecho empaquetado.
- ✓ Los reactivos fluyen a través del lecho catalítico y son convertidos en productos.
- ✓ La consideración más simple es admitir flujo en pistón del fluido (modelos unidimensionales) aunque pueden considerarse la dispersión de materia y calor en las direcciones axial y radial (modelos bidimensionales).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Constituyen de los principales tipos de equipos en la industria química gracias a que existen diferentes formas de reactores de lecho empaquetado (versatilidad) y al gran tonelaje de productos que pueden ser generados con esta tecnología.

- ✓ El catalizador del lecho fijo puede disponerse en las siguientes configuraciones:
- Un único lecho largo
- Múltiples lechos horizontales soportados sobre placas dispuestas en un apilamiento vertical
- Múltiples tubos paralelos empaquetados en un único revestimiento.
- Múltiples lechos cada uno en su revestimiento.

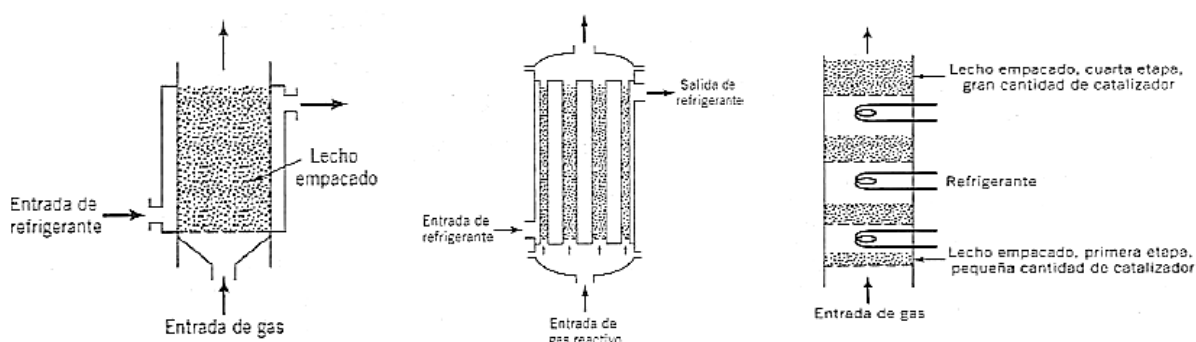


Figura 4.-Posibles configuraciones del lecho en reactores catalíticos

✓ El empaquetamiento en este tipo de reactores consiste en partículas cilíndricas, esféricas o de diferente geometría, dichas partículas suelen tener una gran porosidad, de tal forma que el área superficial interna excede en gran medida al área superficial externa.

Para hacer efectiva el área superficial interna disponible deben utilizarse partículas suficientemente pequeñas para minimizar la resistencia difusional en el interior de la partícula catalítica pero, por otro lado, deben ser lo suficientemente grandes como para que la pérdida de presión a través del lecho catalítico no sea excesivamente elevada. En general, las partículas presentan diámetros que oscilan entre 0,25 y 1 cm.

Respecto de la dirección del flujo de reactivos, suele utilizarse flujo descendente, ya que de este modo los lechos son más estables y no se mueven, no son eliminados del reactor y se minimiza la abrasión del lecho, lo que repercute en una disminución de la cantidad de partículas finas que podrían ser retenidas por el lecho.

Cuando las condiciones de operación incluyen una amplia variación en los caudales de alimentación o cuando la alimentación es un fluido denso es fundamental utilizar flujo descendente. Los principales inconvenientes del flujo descendente son:

- La tendencia del lecho a compactarse
- La gravitación de sólidos finos catalíticos (resultantes del rozamiento), que pueden conducir a un incremento de la caída de presión en el lecho y a maldistribuciones y acanalamientos del flujo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

A continuación se van a exponer las ventajas y desventajas generales de los reactores de lecho fijo, lo que junto a lo ya expuesto nos ayudará a seleccionar un tipo de reactor catalítico de lecho fijo para llevar a cabo nuestra misión en el presente proyecto.

→Ventajas de los reactores de lecho fijo

✓ El principal atributo es su simplicidad: bajos costes de construcción, operación y mantenimiento frente a lechos móviles o lechos fluidizados; el equipo auxiliar que requieren es mínimo.

✓ Especialmente adecuado para su utilización en unidades comerciales pequeñas para las que los costes de control manejo de catalizador y dispositivos auxiliares podrían ser prohibitivos.

✓ No existen problemas de separación del catalizador de la corriente de efluente (como su propio nombre indica: lecho fijo) y no deben incorporarse equipos costosos de separación de las partículas catalíticas.

✓ Pueden operar en una amplia variedad de tiempos espaciales, lo cual es especialmente importante cuando las alimentaciones a procesos pueden variar ampliamente tanto en calidad como en cantidad. Así, para reacciones, empleando catalizadores sólidos, que han de desarrollarse a altas temperaturas o elevadas presiones las consideraciones económicas suelen dictar que el único tipo viable de reactor a utilizar es el de lecho fijo.

→Desventajas de los reactores de lecho fijo

✓ La mala transmisión de calor hacia o desde grandes lechos fijos de partículas catalíticas suele representar un problema importante.

Además, la velocidad de liberación o de consumo de energía a lo largo de la longitud del reactor no es uniforme lo que da lugar a problemas de perfiles internos de temperatura que pueden afectar:

-La estabilidad térmica del lecho.

-La distribución de productos.

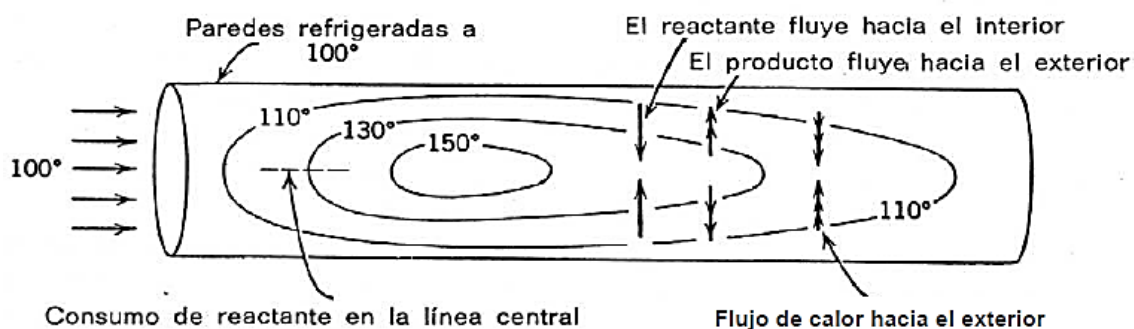


Figura 5.-Ejemplo de perfil de temperaturas generado en un tubo de reactor catalítico

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Dificultad de mantener una distribución de flujo uniforme, la maldistribución del flujo en pistón que conduce a una excesiva variación en la distribución de tiempos de residencia:

- Distorsión respecto del flujo en pistón que conduce a menores conversiones.
- Modificaciones de la distribución óptima de productos para reacciones múltiples.
- Pueden agravarse los problemas de formación de “puntos calientes” y conducir al establecimiento de regiones del reactor en las que predominen las reacciones no deseadas.

✓ La desintegración y rotura debido a las fuerzas de rozamiento de las partículas catalíticas puede agravar los problemas de distribución del flujo.

✓ Necesidad de utilizar partículas catalíticas de tamaño considerable; el tamaño mínimo de las “pellets” está condicionado por:

- Las posibles limitaciones por transferencia de materia en la estructura porosa de las partículas de catalizador (que aumenta al aumentar el tamaño).

- La caída de presión máxima que pueda permitirse para el lecho (que aumenta al disminuir el tamaño).

✓ Dificultades para proceder a la regeneración o al reemplazamiento de las partículas catalíticas desactivadas.

✓ Si la velocidad de desactivación del catalizador es suficientemente rápida el coste económico asociado con la etapa de regeneración o reemplazamiento del catalizador puede hacer inviable el proceso. Posibilidades de mitigar este problema:

- Regeneración “in situ” del catalizador. Para mantener la operación continua, se requieren dos o más reactores en paralelo.
- Prolongar los períodos entre regeneraciones y reposiciones utilizando lechos catalíticos mayores que los requeridos para alcanzar el grado de conversión deseado.

1.7.- Obtención de las ecuaciones de diseño del reactor

Los reactores trickle-bed emplean un lecho fijo sobre el cual fluye líquido entre los espacios vacíos que dejan las partículas de catalizador. El líquido fluye generalmente hacia abajo, y se prefiere el flujo de líquido y gas descendente (paralelo) ya que facilita una distribución uniforme del líquido y permite el empleo de mayores caudales de líquido antes de que surjan limitaciones por inundación.

Los principales usos de los reactores de lecho de goteo son para la hidrodesulfuración, hidrocrackeo e hidrotratamiento de diversas fracciones de petróleo de alto punto de ebullición. Los costes directos y de capital son significativamente menores para el

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

funcionamiento de lecho de goteo que para una unidad de hidrodesulfuración equivalente de funcionamiento en su totalidad en fase vapor. El uso de este tipo de reactores hace que sea posible procesar alimentaciones con punto de ebullición elevados ya que la operación en fase vapor favorecería reacciones secundarias indeseables.

A pesar del hecho de que los reactores de lecho por goteo a menudo se aproximan a comportamiento de flujo en pistón, el uso de una fase líquida en la alimentación introduce importantes complicaciones en el análisis de diseño. La naturaleza y el alcance de la distribución del líquido dentro del lecho de catalizador pueden variar drásticamente con los cambios en los caudales de líquido y vapor, las propiedades de la mezcla de reacción, y el diseño del reactor (especialmente la distribución del líquido en el sistema).

Como los cambios de distribución del líquido, hay cambios en las eficacias de contacto entre el líquido, vapor y catalizador. Por lo general, reactivos gaseosos deben ser absorbidos y transportados a través de una película líquida delgada, hacia el exterior del catalizador. Debemos alcanzar un equilibrio para las reacciones altamente exotérmicas, ya que la energía liberada por la reacciones pueden ser suficiente para volatilizar el líquido en porciones importantes del lecho, en esos casos no se humedece el lecho y habrá un contacto líquido-sólido muy pobre.

Los estudios sobre reactores de lecho fijo establecen una clara clasificación de modelos aplicables para su diseño en función de las condiciones de operación en las que deba llevarse a cabo el proceso de reacción.

1.7.1.-Clasificación de los modelos para reactores de lecho fijo:

1. En función del número de coordenadas espaciales:

- **Modelos unidimensionales:** consideran las variaciones de temperatura y composición sólo en la dirección axial.
- **Modelos bidimensionales:** consideran variaciones de temperatura y composición tanto en dirección axial como radial.

2. En función de dónde se considera que se produce la reacción:

- **Modelos pseudo-homogéneos:** consideran que la reacción se produce en todo el volumen del reactor y no está localizada en la superficie del catalizador. Para el cálculo de estos reactores definiremos ρ_B .

$$(-r_A) = (-r_A)' \rho_B \quad [A1.38]$$

- **Modelos heterogéneos:** consideran que la reacción se produce en la superficie catalítica y requieren utilizar conjuntamente los balances de materia y energía tanto para la fase fluida como para la fase sólida.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.7.2.-Modelo elegido para el diseño

En nuestro diseño vamos a considerar que el reactor de lecho fijo puede representarse mediante:

- Modelos pseudo-homogéneos, dónde el valor de la velocidad de reacción corresponde a un valor promedio para toda la partícula catalítica.
- Variación de propiedades en una única dirección (modelo unidimensional)
- Flujo en pistón para la fase fluida

➤ Estas hipótesis son válidas para el caso isotérmico en el que las variaciones con respecto al modelo de flujo en pistón se deben únicamente a las dispersiones radial y axial, y aun así suelen ser pequeñas. Sin embargo, en condiciones no isotérmicas estas variaciones son importantes, sobre todo las radiales, y es necesario tenerlas en cuenta utilizando un modelo bidimensional.

De la literatura se obtienen también las principales conclusiones del diseño de reactores de lecho fijo:

- 1.-Se emplean partículas de catalizador que provoquen pequeñas pérdidas de carga.
- 2.-La dispersión longitudinal se suele despreciar cuando $(L/d_p) > 100$ [A1.39]
- 3.-La dispersión radial se puede despreciar o no en función de la temperatura. Así, si el sistema opera en condiciones isotérmicas o no existe un perfil acusado de la misma se suele despreciar D_R .
- 4.-Cuando se desprecia el efecto de la dispersión radial se obtiene el modelo de flujo pistón con dispersión axial.
- 5.- Cuando son despreciables tanto la dispersión radial como la axial se obtiene el modelo de flujo en pistón.

Expuesto lo anterior y teniendo en cuenta que en nuestro sistema de reacción cada uno de los tubos se comporta como un reactor independiente que opera en condiciones isotérmicas y con una relación longitud del reactor/diámetro de partícula superior a cien, podemos concluir que se obtendrá como ecuación de diseño la correspondiente a un reactor de flujo en pistón. A continuación se expone el desarrollo matemático correspondiente.

Teniendo en cuenta estado estacionario y modelo unidimensional partiremos directamente de la expresión que se expone, la cual ha sido recogida de la bibliografía “Ingeniería de las reacciones químicas”, O.Levenspeil, Ed.Limusa (2004)

- Partimos de la ecuación del modelo bidimensional: [A1.40]

$$\frac{\partial X_A}{\partial z^*} - \frac{(1-X_A)}{u} \frac{\partial u}{\partial z^*} - \left(\frac{D_L}{u d_p} \right) \frac{\partial^2 X_A}{\partial (z^*)^2} - \left(\frac{D_R}{u d_p} \right) \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial X_A}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 X_A}{\partial (r^*)^2} \right] - \frac{(-r_A)^I \rho_B d_p}{u C_{Ao}} = 0$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Dado que podemos admitir que la velocidad lineal no varía a lo largo del lecho fijo debido a que la pérdida de presión es despreciable (esto se expone en el apartado de cálculo de caída de presión), en este caso u no es función de z , quedando la expresión como:

$$\frac{\partial X_A}{\partial z^*} - \left(\frac{1}{Pe_L} \right) \frac{\partial^2 X_A}{\partial (z^*)^2} - \left(\frac{1}{Pe_R} \right) \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial X_A}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 X_A}{\partial (r^*)^2} \right] - \frac{(-r_A)^I \rho_B d_p}{u C_{A0}} = 0 \quad [A1.41]$$

Cuando la dispersión radial es despreciable $Pe_R \rightarrow \infty$, entonces la ecuación nos queda la ecuación correspondiente al modelo unidimensional:

$$-u \frac{dc_A}{dz} + D_L \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} = (-r_A)^I \rho_B \quad [A1.42]$$

Esta ecuación tiene en cuenta el efecto de la dispersión longitudinal y la expresión es idéntica a la obtenida para el modelo de dispersión axial utilizado en el estudio de flujo no ideal, excepto que se refiere a condiciones de estado estacionario.

Cuando las dispersiones radial y longitudinal son despreciables: $Pe_R \rightarrow \infty$ y $Pe_L \rightarrow \infty$ obtenemos la expresión:

$$-u \frac{dc_A}{dz} = (-r_A)^I \rho_B \quad [A1.43]$$

Multiplicando y dividiendo por S y hacemos las pertinentes transformaciones tendremos la ecuación:

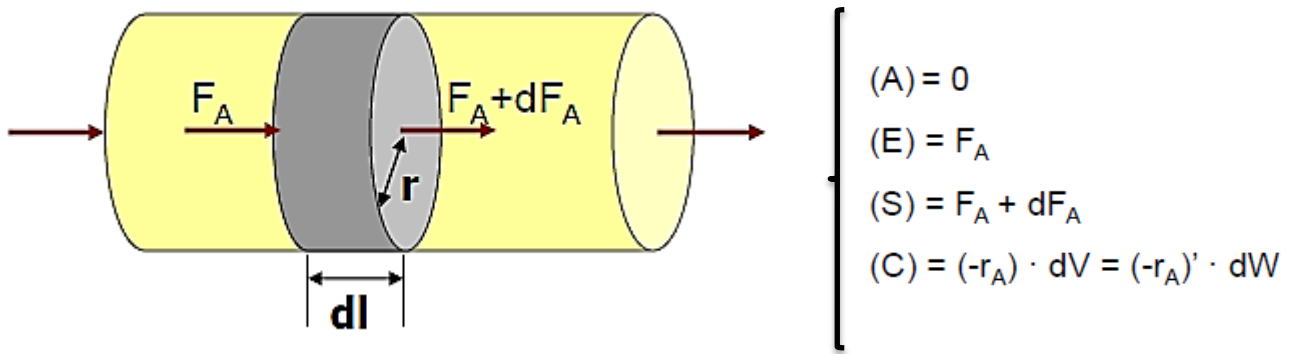
$$\frac{V \rho_B}{Q c_{A0}} = \frac{W}{F_{A0}} = \int_{x_{A0}=0}^{x_A} \frac{dx_A}{(-r_A)^I} \quad [A1.44]$$

Ecuación que se corresponde con la de flujo en pistón con densidad contante, régimen de operación isotérmico y con factor de expansión nulo.

1.7.3.- Desarrollo del modelo y particularización para la reacción de HDS

Admitido ya el comportamiento de flujo en pistón para el reactor bajo estudio, aplicamos el correspondiente balance de materia y obtenemos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.



Sustituyendo las expresiones en el balance de materia correspondiente obtenemos:

$$F_A = (F_A + dF_A) + (-r_A)' \cdot dW \Rightarrow -dF_A = (-r_A)' \cdot dW$$

$$F_A = F_{Ao}(1 - x_A) \Rightarrow dF_A = -F_{Ao} dx_A \Rightarrow F_{Ao} dx_A = (-r_A)' dW \quad [A1.45]$$

Despejando nos queda:

$$(-r_A)' = \frac{F_{Ao} dx_A}{dW} = kC_A = kC_{Ao} \left(\frac{1 - x_A}{1 + \varepsilon_A x_A} \right) \left(\frac{P}{P_o} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right) \quad [A1.46]$$

En el diseño que nos ocupa no hay expansión y las condiciones de operación son isotérmicas por los que:

$$\begin{matrix} \varepsilon_A = 0 \\ T = T_o \end{matrix} \longrightarrow (-r_A)' = F_{Ao} \frac{dx_A}{dW} = kC_{Ao} (1 - x_A) \left(\frac{P}{P_o} \right) = kC_A \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad [A1.47]$$

Haciendo las correspondientes transformaciones para expresar la ecuación anterior en función de la concentración de reactivo y longitud del reactor nos queda:

$$\frac{dC_A}{dL} = -\frac{k}{Q_o} [(1 - \varepsilon_B) A_c \rho_c] C_A \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad [A1.48]$$

Ahora sólo nos queda particularizar esta ecuación genérica para nuestra reacción de interés, para ello haremos uso de la expresión de la velocidad de reacción para la reacción de hidrodesulfuración:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- ✓ Velocidad de reacción evaluada en el poro catalítico:

$$(-r_{HDS}) = k_{HDS} \frac{(C_{sul}^s)^n (C_{H_2}^s)^m}{(1 + k_{H_2S} C_{H_2S}^s)^2} \quad [A1.49]$$

- ✓ Velocidad de reacción evaluada en la superficie del sólido (catalizador):

$$(-r_{HDS})' = \eta_{HDS} \left[k_{HDS} \frac{(C_{sul}^s)^n (C_{H_2}^s)^m}{(1 + k_{H_2S} C_{H_2S}^s)^2} \right] \quad [A1.50]$$

Donde tenemos que definir el factor de eficacia y el módulo de thiele:

- Factor de eficacia: $\eta_{HDS} = \frac{\tanh \phi_{sul}}{\phi_{sul}} \quad [A1.51]$

- Módulo de Thiéle: $\phi_{sul} = \frac{V_p}{S_p} \left[\left(\frac{n+1}{2} \right) \left(\frac{k_{HDS} C_{sul}^{s(n-1)} \rho_p}{D_e^{sul}} \right) \right] \quad [A1.52]$

Por analogía con el caso genérico tendremos pues que el modelo para nuestro reactor viene dado por la expresión:

$$\frac{dC_{sul}}{dL} = -\frac{k_{HDS}}{Q_o} [(1 - \varepsilon_B) A_c \rho_c] \left\{ \frac{\tanh \left\{ \left(\frac{V_p}{S_p} \right) \left[\left(\frac{n+1}{2} \right) \left(\frac{k_{HDS} C_{sul}^{s(n-1)} \rho_p}{D_e^{sul}} \right) \right]^{1/2} \right\}}{\left(\frac{V_p}{S_p} \right) \left[\left(\frac{n+1}{2} \right) \left(\frac{k_{HDS} C_{sul}^{s(n-1)} \rho_p}{D_e^{sul}} \right) \right]^{1/2}} \right\} \left\{ \frac{(C_{sul}^s)^n (C_{H_2}^s)^m}{(1 + k_{H_2S} C_{H_2S}^s)^2} \right\} \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad [A1.53]$$

1.7.4.- Cómo abordar la ecuación para realizar un correcto diseño

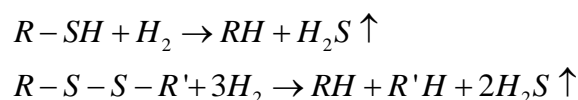
Ante una ecuación diferencial de tal envergadura debemos prestar atención a ciertos términos para buscar posibles simplificaciones y después buscar el método de resolución más apropiado.

- El término $\left(\frac{V_p}{S_p} \right)$ puede expresarse también como: $\left(\frac{1}{S_g \rho_c} \right)$

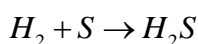
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- El término $\left(\frac{P}{P_o}\right)$ depende de la longitud y para establecer dicha dependencia hemos empleado la ecuación de Ergun como veremos en su correspondiente apartado de caída de presión

Con respecto a las concentraciones de las especies químicas debemos hacer una serie de simplificaciones:



Del conjunto de reacciones bajo estudio podemos finalmente establecer que la reacción que vamos a emplear a lo hora de realizar cálculos es la más simple de las que podemos elegir:



Vamos a imponer unas condiciones de operación en las que el hidrógeno se encuentra en exceso pues la experiencia demuestra que esas son las condiciones idóneas para llevar a cabo nuestra reacción, así podemos tomar la concentración de hidrógeno como un valor constante.

La concentración de sulfuro de hidrógeno por su parte puede expresarse en función de la concentración de azufre teniendo en cuenta que, por estequiometría de reacción, los moles de azufre consumidos coinciden con los de sulfuro de hidrógeno formado, así pues:

$$C_{H_2S} = \left(\frac{C_{sul}^o - C_{sul}^f}{PM_{sul}} \right) PM_{H_2S} \quad [A1.54]$$

- El método de resolución empleado para resolver la ecuación diferencial del perfil de concentraciones es un Runge-Kutta de grado 4, que tiene la siguiente expresión general:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y); y(0) = y_o \quad [A1.55]$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad [A1.56]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$\begin{aligned}
 k_1 &= f(x_i, y_i) \\
 k_2 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h\right) \\
 k_3 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h\right) \\
 k_4 &= f(x_i + h, y_i + k_3h)
 \end{aligned} \quad [A1.57]$$

Donde h es el ancho de paso en el proceso de cálculo numérico en estas expresiones.

1.7.5.-Efecto de la caída de presión en reactores de lecho fijo

Si deseamos determinar si la caída de presión en nuestro reactor es apreciables debemos emplear la ecuación de Ergun, ya que estamos trabajando con un reactor de lecho fijo, esta ecuación en su forma general tiene la siguiente forma:

$$\frac{P_o - P_L}{G^2} \rho \frac{D_p}{L} \frac{\varepsilon_B^3}{1 - \varepsilon_B} = \frac{150(1 - \varepsilon_B)}{D_p \left(\frac{G}{\mu}\right)} + 1,75 \quad [A1.58]$$

De este modo, la caída de presión del fluido por unidad de longitud de lecho será:

$$\frac{P_L - P_o}{L} = - \frac{G}{\rho D_p} \frac{1 - \varepsilon_B}{\varepsilon_B^3} \left[\frac{150(1 - \varepsilon_B)\mu}{D_p} + 1,75G \right] \quad [A1.59]$$

Si la expresamos en forma diferencial nos queda:

$$\frac{dP}{dL} = - \frac{G}{\rho D_p} \frac{1 - \varepsilon_B}{\varepsilon_B^3} \left[\frac{150(1 - \varepsilon_B)\mu}{D_p} + 1,75G \right] \quad [A1.60]$$

Si deseamos expresar la caída de presión en función de la sección transversal del lecho catalítico nos queda:

$$\frac{dP}{dW} = - \frac{G}{\rho D_p} \frac{1}{A_c \rho_c} \frac{1}{\varepsilon_B^3} \left[\frac{150(1 - \varepsilon_B)\mu}{D_p} + 1,75G \right] \quad [A1.61]$$

En todas las expresiones anteriores el término G es la velocidad másica del fluido que se define como:

$$G = \rho v \quad [A1.62]$$

Y dado que la densidad es a su vez dependiente de la presión según las ecuaciones anteriores, tenemos que comprobar en primer lugar si el efecto de la presión en la densidad es apreciable para continuar con nuestro estudio.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

T[°K]	P[atm]	$\rho_L[\text{kg/m}^3]$
293,15	10	928,00
573,15	10	795,98
573,15	9	795,92
573,15	8	795,86
573,15	7	795,80
573,15	6	795,74
573,15	5	795,68
573,15	4	795,62
573,15	3	795,56
573,15	2	795,50
573,15	1	795,44

Tabla 5.-Variación de la densidad con la presión

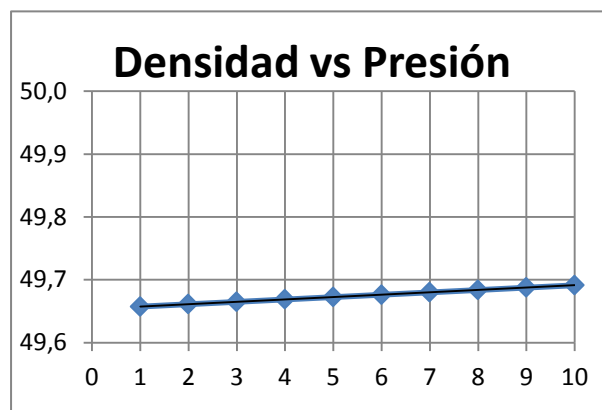


Figura 6.-Representación de la densidad frente a la presión

Tras realizar los pertinentes cálculos podemos concluir que la densidad del fluido permanecerá constante durante el proceso ya que en 10 unidades de presión la densidad apenas varía una décima.

Conocido esto nos disponemos a resolver la ecuación de Ergun en forma diferencial para determinar el valor de la caída de presión que experimenta el fluido al atravesar el lecho, ya que este dato será necesario para el diseño del sistema de reacción.

G[kg/m ² s]	L[m]	P[Pa]
2,47	0	1013250
2,47	0,5	1,01E+06
2,47	1	1,01E+06
2,47	1,5	1,01E+06
2,47	2	1,01E+06
2,47	2,5	1,01E+06
2,47	3	1,01E+06
2,47	3,5	1,01E+06
2,47	4	1,01E+06
2,47	4,5	1,01E+06
2,47	5	1,01E+06
2,47	5,5	1,01E+06
2,47	6	1,01E+06

Resolvemos la ecuación de Ergun tomando un ancho de paso de 0,005 metros, se muestran en la tabla los resultados obtenidos cada medio metro. Como podemos observar la caída de presión que experimenta el fluido al atravesar el lecho es despreciable.

Así pues las suposiciones iniciales del modelo propuesto son correctas al mantenerse la densidad del fluido constante y ser la caída de presión despreciable. Conocido esto nos disponemos a determinar las necesidades de volumen del reactor y sus dimensiones.

ΔP [Pa]	1149,414
ΔP [atm]	0,011344

Tabla 6.-Pérdidas de carga obtenidas

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.8.- Asignación de los flujos

Como ya se ha mencionado, el reactor es un equipo de intercambio de calor de carcasa y tubos, el cual proporcionará una gran área de intercambio de calor.

El fluido que irá por el interior de los tubos será el caudal de gasóleo e hidrógeno, estos proceden del horno en corrientes separadas y se mezclarán en el difusor a la entrada del reactor. El hecho de que sean los fluidos reaccionantes los que pasen por los tubos es debido a que estos fluidos son más corrosivos y la limpieza de los tubos, al ser desmontables, es más fácil. Por otra parte la normativa indica que debe circular por los tubos el fluido que se encuentre a mayor presión, siendo en este caso la corriente de reactivos.

Por el casco circulará el fluido calefactor, el agua. Éste entrará por la carcasa como líquido saturado a 8 bar y saldrá como vapor saturado a la temperatura de entrada y 8 bar de presión para mantener a la corriente reaccionante en condiciones isotérmicas.

1.9.-Determinación del perfil de concentraciones y longitud de los tubos

Para obtener el perfil de concentraciones en el reactor y poder conocer así la longitud de tubo necesaria para alcanzar la conversión deseada en las condiciones de operación nos disponemos a resolver la ecuación A1.53.

Para ello seguiremos las indicaciones que se expusieron en el apartado 1.7.4 y previamente se determinarán los parámetros físico-químicos necesarios de acuerdo a lo expuesto en el apartado 1.5, el valor de estos parámetros se exponen a continuación.

CARACTERÍSTICAS CATALIZADOR	
Área superficial[m ² /g]	180
Volumen poros[cm ³ /g]	0,5
ρ_B (aparente)[g/cm ³]	0,67
Longitud[cm]	0,4
d_c [cm]	0,18
d_s [cm]	0,297
ρ_p [g/cm ³]	1,413
ϵ [adim]	0,518
a_s [cm ⁻¹]	10,72

Tabla 7.-Características del catalizador

PARÁMETROS FACTOR DE EFICACIA	
θ [adim]	0,706
r_g [cm]	5,56E-07
D_k [cm ² /s]	0,0067
τ [adim]	4
u_{cl} [ft ³ /mol]	0,0606
u_L [cm ³ /mol]	699,043
u_{csul} [cm ³ /mol]	158
u_{sul} [cm ³ /mol]	57,417
D_{Lsul} [cm ² /s]	2,41E-04
$D_{e sul}$ [cm ² /s]	4,11E-05

Tabla 8.-Parámetros del factor de eficacia

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

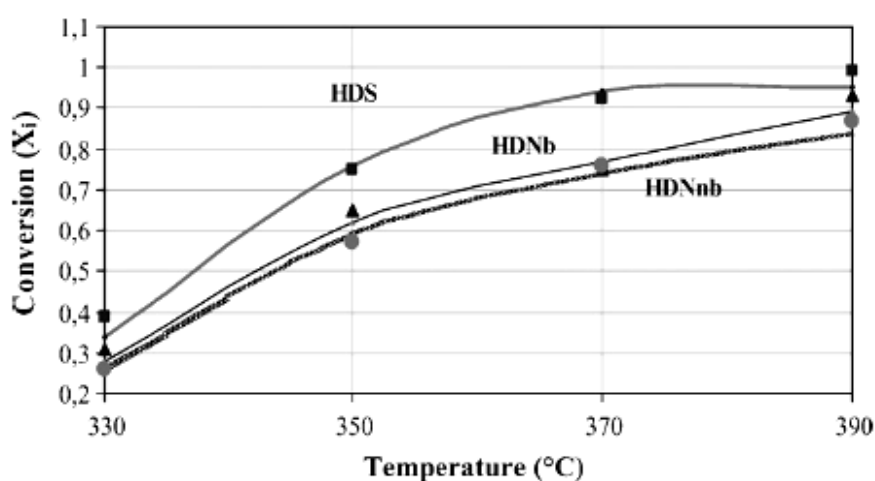
$C_{sul}[g/cm^3]$	$C_{H_2}[g/cm^3]$	$C_{H_2S}[g/cm^3]$	$L[cm]$	k_1	$k_1 \cdot (h/2)$	k_2	$k_2 \cdot (h/2)$	k_3	$k_3 \cdot (h)$	k_4	x_{sul}
0,0398	0,239	0,000	0	-2,11E-03	-1,05E-03	-2,98E-07	-1,49E-07	-2,06E-03	-2,06E-03	-7,66E-08	0,0000
0,0121	0,211	0,029	50	-5,38E-04	-2,69E-04	-1,09E-06	-5,47E-07	-4,95E-04	-4,95E-04	-3,29E-07	0,6956
0,0046	0,204	0,037	100	-1,79E-04	-8,93E-05	-2,77E-06	-1,39E-06	-1,46E-04	-1,46E-04	-1,14E-06	0,8836
0,0021	0,201	0,040	150	-7,16E-05	-3,58E-05	-4,91E-06	-2,46E-06	-5,04E-05	-5,04E-05	-2,88E-06	0,9476
0,0010	0,200	0,041	200	-3,10E-05	-1,55E-05	-6,27E-06	-3,13E-06	-2,00E-05	-2,00E-05	-4,65E-06	0,9747
0,0005	0,199	0,042	250	-1,28E-05	-6,38E-06	-5,61E-06	-2,81E-06	-8,53E-06	-8,53E-06	-4,51E-06	0,9883
0,0002	0,199	0,042	300	-4,65E-06	-2,32E-06	-3,29E-06	-1,64E-06	-3,62E-06	-3,62E-06	-2,77E-06	0,9952
0,0001	0,199	0,042	350	-1,57E-06	-7,87E-07	-1,38E-06	-6,90E-07	-1,40E-06	-1,40E-06	-1,25E-06	0,9981
0,0000	0,199	0,042	400	-5,50E-07	-2,75E-07	-5,22E-07	-2,61E-07	-5,23E-07	-5,23E-07	-4,98E-07	0,9992
0,0000	0,199	0,042	450	-2,10E-07	-1,05E-07	-2,04E-07	-1,02E-07	-2,05E-07	-2,05E-07	-2,00E-07	0,9997
0,0000	0,199	0,042	500	-8,78E-08	-4,39E-08	-8,65E-08	-4,32E-08	-8,65E-08	-8,65E-08	-8,52E-08	0,9998
0,0000	0,199	0,042	550	-3,99E-08	-2,00E-08	-3,95E-08	-1,98E-08	-3,95E-08	-3,95E-08	-3,91E-08	0,9999

Tabla 9.-Perfil de concentraciones y conversión alcanzada

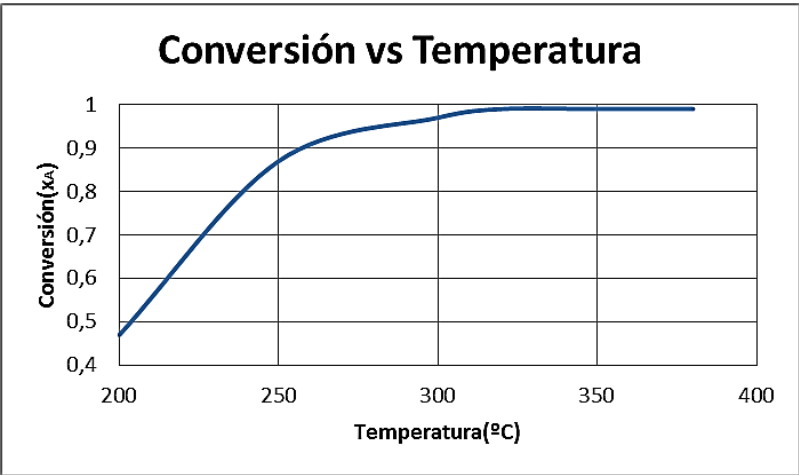
Aplicando el método de resolución numérico de Runge-Kutta grado 4, tal y como de detalla en el apartado 1.7.4 del presente anexo se obtiene el perfil de concentraciones. Se exponen los datos cada medio metro de tubo así como los gráficos obtenidos y una comparativa con datos bibliográficos recogidos en planta piloto y plantas reales.

Los resultados recogidos en esta tabla corresponden a un ancho de paso de un centímetro en la aplicación del método de resolución. Para comprobar que los datos obtenidos son coherentes y fieles al modelo veamos los perfiles obtenidos frente a tablas recogidas de la bibliografía. Se hace esta comparativa de acurdo a las gráficas que se exponen a continuación:

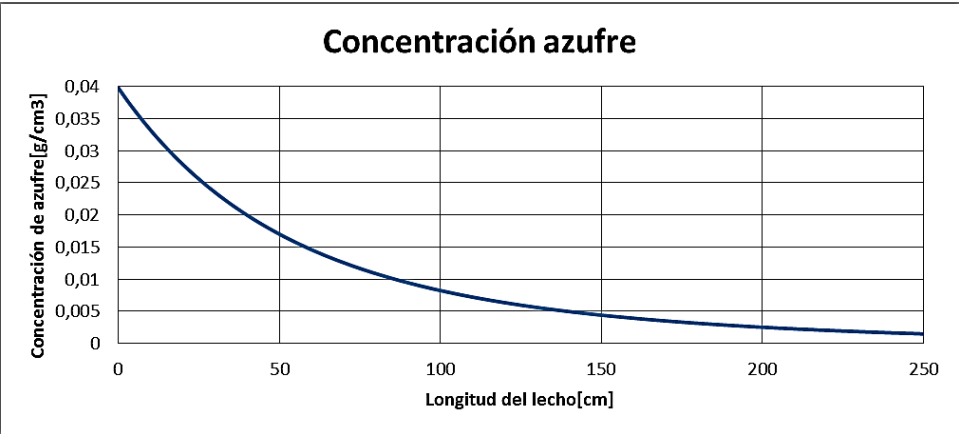
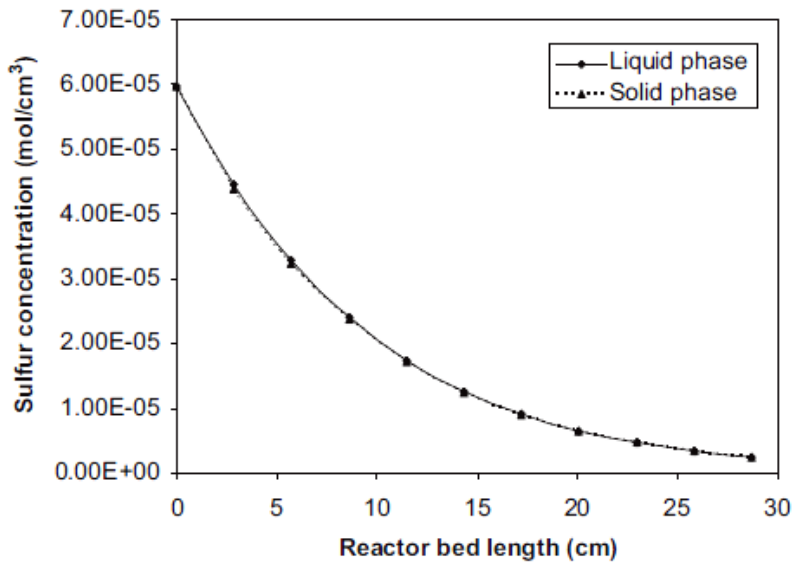
→CONVERSIÓN FRENTE A TEMPERATURA



Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

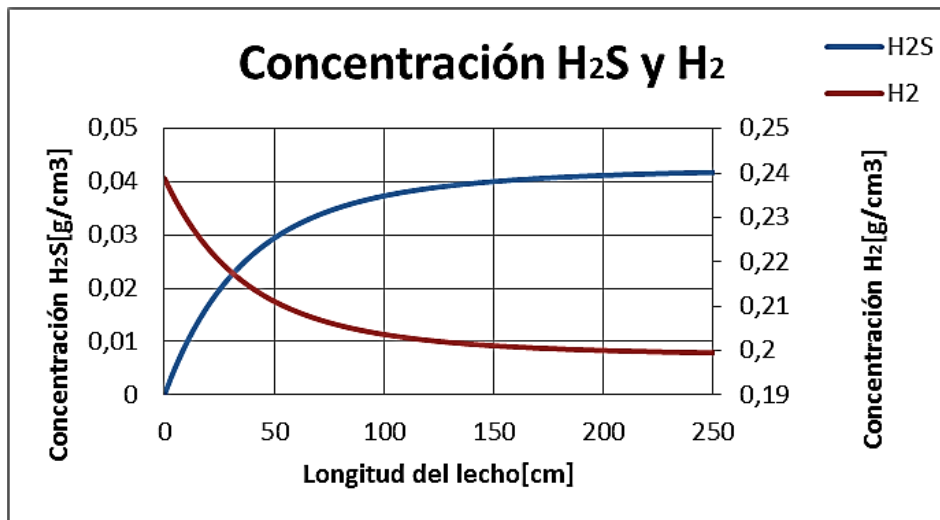
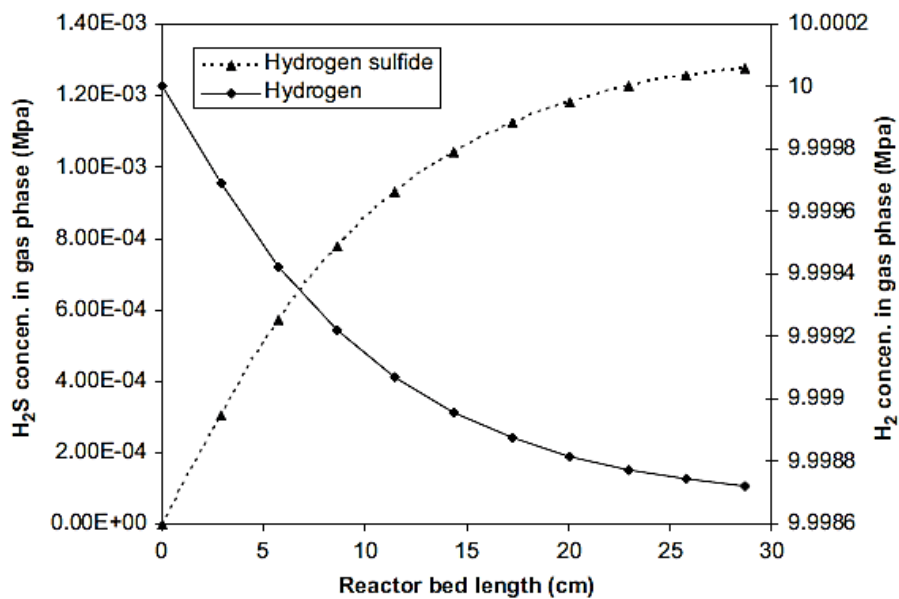


→PERFIL DE CONCENTRACIÓN DEL AZUFRE



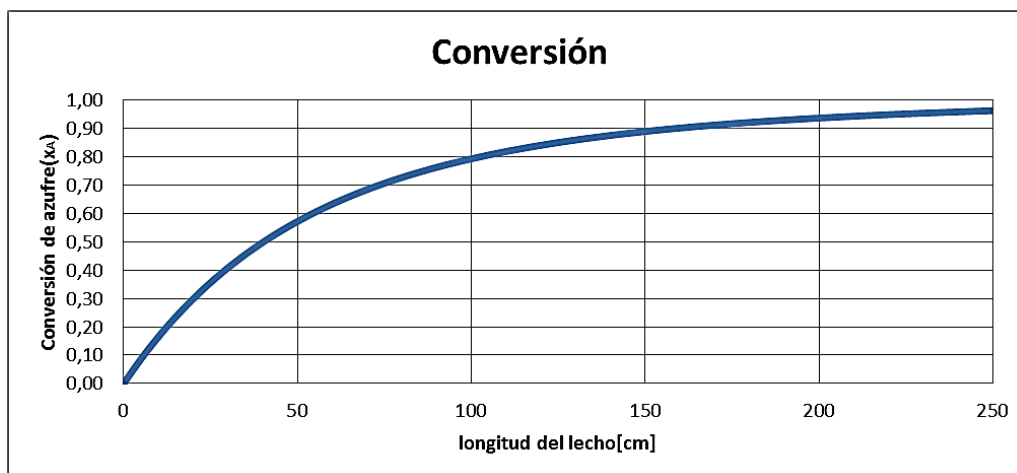
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

→PERFILES DE CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO Y SULFURO DE HIDRÓGENO



Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

→CONVERSIÓN MÁXIMA ALCANZADA EN EL REACTOR



1.10.-Obtención del volumen del reactor

Los reactores se diseñan con un objetivo preestablecido de necesidades de producción tal que el caudal de alimentación que debe tratarse en la refinería en la que se ha basado el diseño es de 22000 barriles al día (22000 bbl/día).

Así se obtienen los siguientes datos de volumen de reactor y número de reactores que son necesarios para satisfacer las necesidades de producción.

ALIMENTACIÓN	
Q[bbl/día]	22000
Q[L/h]	143000
LHSV[h ⁻¹]	2,2
V alim[L]	65000
Q[m ³ /s]	0,040
G[kg/m ² s]	4025,74
G[kg/m ² s] de un tubo	2,47
τ [h]	0,455

Tabla 10.-Determinación de volumen del reactor

Por consideraciones de diseño que se exponen más adelante se dispondrán dos reactores idénticos de 32,5 metros cúbicos de capacidad cada uno.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.11.- Dimensiones del reactor

Aunque, como se ha mencionado, el reactor es un intercambiador de calor por el que es necesario pasar agua como refrigerante para que el sistema no suba su temperatura, no es posible diseñar al mismo atendiendo a las dimensiones estándar por las que se rigen los intercambiadores según las normas *TEMA*. Es decir, no se puede elegir un modelo con un número determinado de tubos y un diámetro de carcasa estándar. Esto se debe al gran volumen de reacción.

Por ello se estimarán las dimensiones fijando una longitud de tubos y el diámetro del mismo para hallar el número de tubos, el diámetro del haz de tubos y así el diámetro de carcasa. Estableceremos de este modo un proceso de cálculo iterativo que nos llevará a las dimensiones finales de nuestro reactor, respetando siempre la normativa.

Sabemos que el fluido reaccionante es el que pasa por el interior de los tubos, luego el volumen de reacción corresponde a la suma del número total de tubos que componen el reactor con un volumen correspondiente al de un cilindro.

$$V = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \cdot L \cdot N_{\text{tubos}} \quad [\text{A1.63}]$$

Donde:

V: volumen del reactor

D_i : diámetro interno de los tubos

L: longitud de los tubos

N_{tubos} : número total de tubos

Sustituyendo y tomando un número entero inmediatamente superior tendremos el número de tubos totales del reactor.

Con este número de tubos, se va a hallar el diámetro del haz de tubos que tiene el reactor. El diámetro del haz de tubos depende del número de tubos y de su distribución. Una estimación del diámetro del haz de tubos se puede obtener de la siguiente ecuación, la cual es una ecuación empírica basada en distribuciones estándar de tubos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$D_{\text{haz}} = D_0 \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/a} \quad [\text{A1.64}]$$

Las constantes K_1 y a que se necesitan para resolver esta ecuación vienen tabuladas en la bibliografía para arreglos triangulares, como es el caso.

Arreglo triangular, Pitch =1,25 Do					
Nº pasos	1	2	4	6	8
K_1	0,319	0,249	0,175	0,0743	0,0365
a	2,142	2,207	2,207	2,285	2,675

Tabla 11.-Parámetros para determinar el diámetro del haz de tubos según tipo de arreglo y número de pasos

Sustituyendo dichas constantes para el caso de un solo paso por los tubos en la ecuación anterior obtendremos el valor de D_{haz} para nuestro sistema de reacción.

A continuación se debe hallar el diámetro de la carcasa del reactor, este debe seleccionarse de tal manera que se pueda obtener cierto espacio entre el diámetro del haz de tubos D_{haz} y el diámetro interior del casco D_c . Este espacio dependerá del tipo de intercambiador y las tolerancias de los fabricantes.

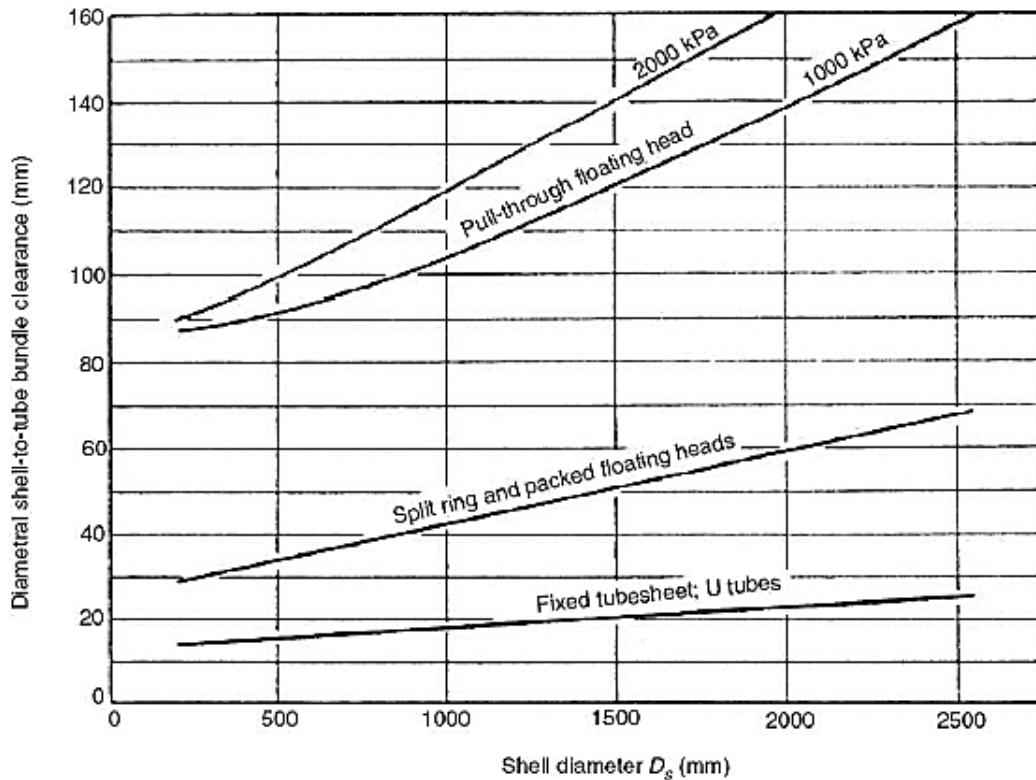


Figura 7.-Gráfica para la estimación del diámetro de carcasa

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Esta figura indicará la distancia que habrá entre el diámetro de carcasa y el diámetro del haz de tubos. Para ello se supone un diámetro de carcasa y tomando la figura se busca la distancia que debe de haber entre ambos diámetros. Conocida dicha distancia se calcula el diámetro del haz de tubos. Si coincide con el calculado anteriormente, se tomará por bueno el diámetro de carcasa supuesto. En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos:

Arreglo triangular, Pitch =1,25 Do	
Nº pasos	1
K ₁	0,319
a	2,142
D _{haz} [m]	3,898
Nº reactores	2
V _{total} [m ³]	65
V _{reactor} [m ³]	32,5
Longitud [m]	5,076
Nº de tubos	774
Do[m]	0,1
Ac[m ²]	7,85E-03
Diámetro de la carcasa[in]	159,440

1.12. -Diseño mecánico

En este apartado se calcularán los espesores tanto de los tubos como el de la carcasa.

1.12.1E.-spesor de los tubos

Los cálculos seguidos para conseguir hallar el espesor de los tubos del intercambiador han sido realizados según el código ASME B31.3.

Conforme al mismo, el espesor de los tubos, que se consideran conducciones cilíndricas de pequeño diámetro sometidos a presión, será calculado con la siguiente ecuación:

$$t = \left(\frac{D_o \cdot P_d}{2 \cdot (S \cdot E + Y \cdot P_d)} + C \right) \left(\frac{1}{1 - \frac{M}{100}} \right) \quad [A1.64]$$

Donde:

D_o: diámetro exterior de los tubos

P_d: presión de diseño

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

S: tensión máxima permisible

E: eficiencia de la soldadura

Y: coeficiente que depende del material de la tubería y de la temperatura de diseño

C: margen por corrosión

M: tolerancia de fabricación

En adelante se calcularán cada uno de estos términos:

•Diámetro exterior de los tubos, D_o

Como ya se ha comentado en numerosas ocasiones el diámetro exterior de los tubos es de 0,1 metros. Debemos trabajar en unidades anglosajonas a partir de ahora por lo que tomaremos $D_o=3,94$ in

•Presión de diseño, P_D

La presión de diseño es un 10% mayor a la presión de operación. En este caso, la presión de operación es de 10 atmósferas, es decir, 10,13 bares.

$$P_D = 1,1 \cdot P_{operación} \quad [A1.65]$$

Por lo tanto P_D tendrá un valor de 11,15 bares, lo que expresado en unidades anglosajonas tomara un valor de 161,65 psi.

•Tensión máxima permisible, S

Para determinar la tensión máxima que puede permitir el material de los tubos se recurre a la **tabla A8.1** donde la tensión máxima admisible para acero inoxidable TP347L es de 18400 psi para temperaturas que rondan los 800°F.

•Eficiencia de la soldadura, E

La eficiencia de la soldadura mide la disminución de la eficiencia del material debido a que las uniones soldadas no son tan resistentes como el resto del material. Se recurre a la **tabla A8.7** del anexo para concluir que la eficiencia para tubos sin costura que tengan una junta a tope u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado por el interior y el exterior de los tubos toma un valor de 1.

•Factor Y

Y es un coeficiente que depende del material de la tubería y de la temperatura de diseño. Éste se obtiene a partir de la **tabla A8.8**.

Para temperaturas inferiores a los 900°F, como es el caso y para un material austenítico, se tiene un factor Y de 0,4.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

•Margen de corrosión, C

Según el código ASME VIII-Div.1, para diseñar unidades de proceso que puedan ser sometidas a corrosión, erosión o abrasión mecánica, es necesario definir un margen de corrosión, capaz de predecir el desgaste del espesor, asegurando que la vida útil del equipo sea la prevista.

Se considera un desgaste por corrosión de 5 milésimas de pulgada por año siendo este satisfactorio para recipientes y tuberías.

La vida media esperada para un recipiente, es más bien de una cuestión económica. Se considera un valor moderado para la vida de operación, principalmente por razones de seguridad, así que se tomará una vida de 15 años.

El margen de corrosión se tomará como el valor del desgaste producido durante ésta, por lo tanto $C=0,005 \text{ in/año}$.

Calculado así el valor de C:

$$C = 15 \text{ años} \cdot 0,005 \frac{\text{in}}{\text{año}} = 0,0075 \text{ in} = 0,1905 \text{ cm}$$

•Tolerancia de fabricación, M

Las tuberías sin costura tienen una tolerancia considerable en el espesor. En este caso la tolerancia en el espesor de pared es de 12,5%.

Sustituyendo todos los datos obtenidos se puede hallar el espesor del tubo. Como es siempre necesario se recurre a las tablas para encontrar el espesor normalizado correspondiente al diámetro externo del tubo. Por ello, yendo a la **tabla A8.9** se aprecia como el valor inmediatamente superior al calculado es 0,105 in (12BWG).

Los resultados obtenidos se recogen en las tablas que se muestran a continuación:

Do (diámetro externo)[in]	3,937
Vida del equipo estimada[años]	15
Presión de diseño[bar]	11,146
Presión de diseño[psi]	161,655
S(tensión máxima permisible)[psi]	18400
E(eficiencia de soldadura)	1
Factor Y	0,4
C(margen de corrosión)[in]	0,075
C(margen de corrosión)[cm]	0,1905
M(tolerancia de fabricación)	0,125

t(espesor de tubos)	
[in]	0,105
[cm]	0,268
BWG	12

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.12.2.-Espesor de la carcasa

En primer lugar, es imprescindible, antes de abordar el cálculo del espesor de la carcasa, conocer el espesor mínimo que, por normativa y por el material del que está formado, debe tener. Según el código ASME, sección VIII, división 1 el espesor mínimo es:

$$t_{\min} (mm) = 5 + C = 6,905 mm = 0,196 in$$

Por otro lado, según el material que se utiliza, acero al carbono, este debe ser como mínimo 12,7 mm por normativa, nos quedaremos con este valor por ser el mayor de entre los valores posibles.

Para calcular entonces el espesor de la carcasa se sigue entonces el siguiente método expuesto en el código ASME-VII-1

Se deben considerar los esfuerzos provocados por la presión interna ya que los esfuerzos que puedan afectar en el equipo (**tabla A8.4**), son prácticamente insignificantes en condiciones normales con respecto a la presión interna a la que se somete el mismo.

Carga	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
Presión interior	X		X	
Presión exterior				
Peso				X
Viento			X	X
Seísmo			X	X

Tabla 11.-Tipos de tensiones que ejerce cada carga

Teniendo en cuenta que esas tensiones internas son longitudinales y circunferenciales, debe hallarse el espesor que podría soportar cada una por separado. El mayor valor obtenido será el espesor más adecuado para el diseño. Las relaciones que permitirán calcular el espesor se dan a continuación:

- ✓ Tensión circunferencial:

$$t_{\text{circ}} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A1.66]$$

- ✓ Tensión longitudinal:

$$t_{\text{long}} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A1.67]$$

Donde:

P_D : presión de diseño interna

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

R: radio interior de la envolvente

S: máxima tensión admisible

E: eficiencia de la junta

De la misma manera que se hizo al calcular el espesor de los tubos, se determinará cada término por separado.

•Presión de diseño, P_D

En esta ocasión se escogerá la presión de diseño mayor entre dos valores. Por norma es como mínimo 30 psi o bien un 10% mayor a la presión de operación. El segundo de los valores posibles es de 127,63 para nuestras condiciones de operación, por lo que nos quedaremos con este valor por ser más elevado.

•Radio interior de la envolvente, R

El radio de la envolvente no es más que el radio de la carcasa. Conocido su diámetro, podemos determinar el radio.

Diámetro de la carcasa[in]	159,44
Radio de la carcasa[in]	79,72

•Temperatura de diseño, T_D

La temperatura de diseño se calcula para poder considerar ésta al calcular la máxima tensión permisible.

Por norma general la temperatura de diseño se toma 20°C superior a la máxima temperatura que consigue el fluido en la carcasa.

Considerando que debemos expresarla en unidades inglesas tendremos una temperatura de diseño de 374,74 °F.

•Máxima tensión admisible, S

Para determinar la máxima tensión que puede permitir el material de la carcasa se recurre a la **tabla A8.1** para temperaturas inferiores a 400°F donde la tensión máxima admisible para el acero al carbono SA-285 en placas es de 15400 psi.

•Eficiencia de junta, E

Volviendo a la **tabla A8.7** para una junta a tope con doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado y siendo examinadas las juntas por zonas pero radiografiadas por zonas de eficiencia de soldadura, la eficiencia de soldadura toma un valor de 0,85.

Sustituyendo los datos en las ecuaciones anteriores obtendremos los valores de tensión circunferencial y longitudinal.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$t_{\text{circ}}[\text{in}]$	0,782
$t_{\text{long}}[\text{in}]$	0,388

El mayor de los dos valores es de la tensión circunferencial, por tanto y de momento, este será el valor del espesor exento de corrosión.

Añadiendo el sobre espesor por corrosión se tiene:

$$t = 0,782 \text{ in} + 0,075 = 0,857 \text{ in}$$

Y nuevamente se acude a las tablas para buscar el espesor comercial, en este caso de chapas gruesas, que es el inmediatamente superior a este último:

$t_{\text{carcasa}}[\text{in}]$	1,0
$t_{\text{carcasa}}[\text{mm}]$	25,4

En la siguiente tabla se recogen todos los parámetros que se han calculado para determinar el espesor de la carcasa:

Espesor min (ASME)[in]	0,5
Diámetro de la carcasa[in]	159,44
Presión de diseño[psi]	127,63
Temperatura de diseño[°F]	374,74
S(tensión máx. permisible)[psi]	15400
E(eficiencia de junta)	0,85
Radio de la carcasa[in]	79,72
$t_{\text{circ}}[\text{in}]$	0,782
$t_{\text{long}}[\text{in}]$	0,388
$t_{\text{carcasa}}[\text{in}]$	1,0
$t_{\text{carcasa}}[\text{mm}]$	25,4

1.13.- Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga dependen de las propiedades del fluido, como la densidad y la viscosidad; de la velocidad a la que este pasa y de las dimensiones del equipo. En este apartado se evaluarán tanto las pérdidas de carga en los tubos como en la carcasa.

1.13.1.-Pérdida de carga por rozamiento con la pared de la tubería

Para hallar la pérdida de carga en los tubos se utiliza la ecuación de Fanning:

$$\Delta P_{\text{tubos}} = \frac{f \cdot G^2 \cdot L}{D_i \cdot \rho} \quad [\text{A1.68}]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Siendo:

F: factor de fricción

G: velocidad másica del fluido que circula por los tubos

L: longitud de los tubos

D_i: diámetro interno de los tubos

P: densidad media del fluido que circula por los tubos

El único término que falta por conocer es el factor de fricción, que se halla a raíz del diagrama de Moody.

1.13.1.1.-Datos necesarios para determinar el factor de fricción

El factor de fricción f, se determina a partir del diagrama de Moody expuesto en la **figura A8.1**. Para hallarlo es necesario conocer el número de Reynolds y la rugosidad relativa de los tubos.

G[kg/m ² s]	17,29
D _i [m]	0,097
μ[Pa·s]	3,33E-04
L[m]	5,076
ρ[kg/m ³]	795,98
Reynolds[adim]	5,05E+03
f(factor de fricción)	0,038
ΔP _{tubos} [Pa]	0,74

1.13.1.2.-Pérdida de carga en la carcasa

El cálculo de pérdida de carga en la carcasa es conseguido aplicando el método Kern, al igual que se hizo en el cálculo de la película externa de los tubos:

$$\Delta P_{carcasa} = \frac{f \cdot G_c^2 (N_c + 1) \cdot D_c}{D_{eq} \cdot \rho} \quad [A1.69]$$

Siendo:

F: factor de fricción

G_c: velocidad másica del fluido que circula por la carcasa

N_c: número de deflectores

D_c: diámetro de la carcasa

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

P: densidad del fluido que circula por los tubos

D_{eq} : diámetro equivalente

1.13.2.-Cálculo del factor de fricción

Con el número de Reynolds ya calculado, y los valores de rugosidad absoluta y relativa, ya estamos en condiciones de dirigirnos al diagrama de Moody para determinar el valor del factor de fricción.

El número de Reynolds obtenido para este caso es de:

$$Re = 2416,48$$

La rugosidad relativa para aceros al carbono es de:

$$\varepsilon = 0,0457mm$$

Ahora se está en condiciones de dirigirse al diagrama de Moody donde el factor de fricción obtiene un valor de:

$$f = 0,0265$$

1.13.3.-Cálculo del diámetro equivalente

El vapor fluye por la carcasa y ésta es un conducto con sección diferente a la circular en su diámetro por lo que debemos calcular lo que se denomina el diámetro equivalente.

Dicho diámetro equivalente es cuatro veces el radio hidráulico, y por radio hidráulico se conoce a la relación de la sección disponible para el paso del fluido y el perímetro mojado de la conducción. A pesar de los deflectores, el diámetro equivalente se considera como si el fluido fuese paralelo a los tubos.

$$D_{eq} = 4 \cdot \frac{\text{Sección de paso}}{\text{Perímetro mojado}} \quad [A1.70]$$

Luego, el diámetro equivalente para una disposición tresbolillo es:

$$D_{eq} = 4 \cdot \left(\frac{\left(\sqrt{3/4} \cdot Pitch^2 \right) - \left(\frac{1}{2} \pi \frac{D_o^2}{4} \right)}{\pi \frac{D_o}{2}} \right) \quad [A1.71]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Sustituyendo obtenemos los valores del diámetro equivalente. A continuación se expone una tabla con el resumen de cálculos de la pérdida de carga en la carcasa:

Pitch[in]	1,25
D _o [in](diámetro externo de los tubos)	3,94
Deq[in]-disposición tresbolillo-	9,63
Deq[cm]-disposición tresbolillo-	24,46
G _c [kg/m ² s](veloc másica fluido carcasa)	4,42
D _c [m](diámetro de carcasa)	4,05
N _c (número de deflectores)	3
ρ[kg/m ³]	437,23
Reynolds[adim]	2416,48
f(factor de fricción)	0,0265
ΔP _{carcasa} [Pa]	4,51E-04

1.13.4.-Pérdida de carga total

La pérdida de carga total será la suma de la pérdida de carga que se produce en los tubos más la propia de la carcasa, la caída de presión que produce el relleno se determinó previamente en el apartado 1.7.5.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{tubos} + \Delta P_{carcasa} + \Delta P_{relleno} = 1150,16 Pa$$

Por lo tanto se puede considerar nula la pérdida de carga de cada reactor.

1.14.- Diámetro del haz y número de tubos. Relación L/D del sistema de reacción.

Por condiciones de diseño se desea que el diseño mecánico del reactor satisfaga la siguiente relación de dimensiones por ser la más empleada y la que da mejores resultados una vez implantados en la industria este tipo de reactores.

$$L = 1,3 \cdot D_{haz} \quad [A1.72]$$

Ya hemos visto anteriormente la ecuación que relaciona estos dos parámetros, que es la siguiente:

$$D_{haz} = D_o \left(\frac{N_T}{k_1} \right)^{1/a} \quad [A1.73]$$

Despejando esta ecuación y considerando nuestra condición de diseño nos queda:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$L = 1,3D = 1,3D_o \left(\frac{N_T}{k_1} \right)^{1/a} \quad [A1.74]$$

Ahora vamos a relacionar esta ecuación con la ecuación de volumen del reactor $V_R = \tau \cdot Q$. Así pues tendremos:

$$V_R = N_T \left[\pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \right] L_{tubo} = N_T \left[\pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \right] 1,3D_o \left(\frac{N_T}{k_1} \right)^{1/a} = \tau Q \quad [A1.75]$$

Despejando de esta ecuación cuidadosamente se tiene por tanto el número de tubos necesarios en nuestro reactor para respetar las necesidades de reacción y producción satisfaciendo al mismo tiempo las necesidades de diseño mecánico:

$$N_T = \left(\frac{4Q}{1,3\pi} \right)^{a/a+1} \left(\frac{k_1^{1/a}}{D_o^3} \right)^{a/a+1} \tau^{a/a+1} \quad [A1.76]$$

En la siguiente tabla se exponen las dimensiones finales del reactor de acuerdo a esta última consideración:

τ (tiempo espacial)[s]	1636,36
Q_v (caudal volumétrico)[m ³ /s]	1,99E-02
K_1 (cte)	0,319
a (cte)	2,142
D_o (diámetro ext. de los tubos)[m]	0,103
N_t (número de tubos)	774
Ratio L:D(adimensional)	1,3
D_{haz} [m]	3,904
$L_{reactor}$ [m]	5,076
$V_{reactor}$ [m ³]	32,5

1.15.-Deflectores o baffles

Es sabido que los coeficientes de transferencia de calor crecen al aumentar la velocidad de los fluidos. Por este motivo, casi siempre se colocan en la carcasa, deflectores de flujo o baffles que orientan el movimiento del fluido en la dirección perpendicular al eje de los tubos. El más común es el deflector segmentado, que son placas circulares con diámetro muy similar al de la carcasa, a las cuales se les efectúa un corte horizontal o vertical. Estas placas van montadas dentro de la carcasa de tal modo que en placas consecutivas los cortes se encuentran girados 180°. Obviamente, las placas deben estar perforadas para permitir que los tubos las atraviesen.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El fluido entonces se ve obligado a efectuar el mismo recorrido que marcan los deflectores para alcanzar la boca de salida.

1.15.1.- Espaciamiento entre deflectores

Para conocer la distancia que hay entre deflectores se debe calcular la media entre la separación máxima permisible y la mínima.

La separación mínima permisible puede ser o un valor de 2 pulgadas o una quinta parte del diámetro de la carcasa. El valor más alto de éstos se tomará como el espaciamento mínimo que debe de haber.

$P_{ef, min}[in]-fijo-$	2
$P_{ef, min}[in]-según D_{carcasa}-$	31,89

Por otro lado, la separación máxima depende del material y del diámetro externo de los tubos. Si se atiende a la **tabla A8.11 del anexo** de tablas y sabiendo que el material es de acero inoxidable y su diámetro externo podemos determinar el espaciamento máximo entre deflectores.

$P_{ef, máx}$	125
---------------	-----

Haciendo una media entre la distancia mínima y máxima se tiene que el espaciamento entre los deflectores es de:

$P_{ef, medio}[in]$	78,44
$P_{ef, medio}[m]$	1,99

1.15.2.-Número de deflectores

El número de deflectores se calcula como el cociente entre la longitud de los tubos y el espaciamento entre deflectores.

$$N_c = \frac{L}{P_{ef}} \quad [A1.77]$$

Siendo:

N_c : número de deflectores

L : longitud de los tubos

P_{ef} : espaciamento, tomamos el espaciamento medio.

Sustituyendo los correspondientes valores se tiene que:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Nc[adim]	2,55
----------	------

Se usará por tanto un total de 3 deflectores en nuestro sistema de reacción.

Al utilizar 3 deflectores a lo largo del reactor, el espaciado definitivo entre ellos será de 1,27 m.

1.15.3.-Espesor de los deflectores

Como establecen las normas *TEMA* el espesor es función del diámetro nominal de la carcasa y de la separación entre los deflectores, ver **tabla A8.12**.

Espesor deflectores[in]	0,75
Espesor deflectores[cm]	1,91

1.15.4.-Diámetro de los deflectores

Como mencionamos anteriormente, el diámetro de los deflectores es algo menor al de la carcasa dejando siempre un segmento libre. Según la bibliografía, concretamente se consultó el libro “Process Heat Transfers” de Robert W.Serth (Elseiver,2007), el diámetro del deflector puede expresarse como:

$$D_b = D_c - \delta_{s-B} \quad [A1.78]$$

Donde D_b y D_c son los diámetros del deflector y de la carcasa respectivamente y siendo δ_{s-B} la distancia entre la carcasa y el propio deflector; se calcula de la siguiente manera:

$$\delta_{s-B} = 0,8 + 0,002D_c + 0,75 \quad [A1.79]$$

Realizando los cálculos pertinentes se obtienen los siguientes resultados:

D_c [mm]	4049,78
δ_{s-B} [mm]	9,65
D_b [mm]	4040,13

1.16.-Aislamiento

Para el aislamiento del reactor se usará lana de roca, ya que cubre las necesidades técnicas del equipo y se trata de un material que de forma más económica cubre los requerimientos del proceso y del recipiente. Entre la carcasa y la lana de roca habrá una chapa de aluminio.

El espesor de la lana de roca es función de la temperatura a la que se opera en la carcasa, que es de 300 °C, por lo que tomaremos una temperatura de diseño de 320 °C .Esta dependencia viene reflejada en la **tabla A8.14**.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Según esta se obtiene un espesor de lana de roca de 120 mm.

1.17.- Balance de energía del sistema

El balance de energía general que se aplica a reactores tubulares es el siguiente:

$$(A) = (E) - (S) + (G) - (C) \quad [A1.80]$$

Siendo cada término como sigue:

(A): acumulación de energía calorífica en el elemento de dV.

$$(A) = m_T \overline{C_p} \frac{dT}{dt} \quad [A1.81]$$

(E): Flujo de entrada de energía calorífica en el elemento de dV

(S): Flujo de salida de energía calorífica en el elemento de dV

$$(E) - (S) = -m_T \overline{C_p} dT \quad [A1.82]$$

(G): Generación de energía calorífica por reacción en el elemento dV.

$$(G) = \frac{(-\Delta \overline{H_r})(-r_{TOL})dV_R}{(-v_{TOL})} \quad [A1.83]$$

(C): Flujo de energía calorífica que se transmite a través de dV

$$(C) = dQ \quad [A1.84]$$

Donde:

M_T : caudal másico total (es igual a la entrada que en la salida)

C_p : capacidad calorífica

ΔH_r : entalpía de reacción

V_{TOL} : coeficiente de reacción del reactivo (azufre)

En estado estacionario el término de acumulación es igual a cero, y la velocidad de intercambio de calor a través del elemento diferencial de volumen vendrá dado por:

$$dQ = U(T_m - T)dA \quad [A1.85]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

U: coeficiente global de transferencia de materia

T_m: temperatura del agua de condensado como refrigerante

T: temperatura del fluido

A su vez, el diferencial del área y volumen que indican el área y el volumen respectivamente del tubo de radio r de una longitud dl es:

$$dA = 2\pi r \cdot dl \quad [A1.86]$$

$$dV_R = \pi r^2 \cdot dl \quad [A1.87]$$

Teniendo en cuenta ambas ecuaciones se tiene que:

$$dA = \frac{2\pi r^2 dl}{r} = \frac{2}{r} dV_R = \frac{4}{D} dV_R \quad [A1.88]$$

Combinando esta ecuación con la ecuación de balance de materia para el caso general de un reactor de flujo en pistón se obtiene lo siguiente:

$$dA = \frac{4}{D} \frac{F_{sul,o} dx_{sul}}{(-r_{sul})} \quad [A1.89]$$

El término de velocidad de intercambio se expresa entonces como:

$$dQ = U (T_m - T) \frac{4}{D} \frac{F_{sul,o} dx_{sul}}{(-r_{sul})} \quad [A1.90]$$

Por tanto el balance de energía nos queda ahora con la siguiente forma:

$$U (T - T_m) \frac{4}{D} \frac{F_{sul,o} dx_{sul}}{(-r_{sul})} = -m_T \bar{C}_p dT + \frac{(-\Delta \bar{H}_r)(-r_{sul}) dV_R}{(-v_{sul})} \quad [A1.91]$$

En condiciones isotérmicas, la temperatura final e inicial del fluido coinciden, ya que todo el calor que se libera durante la reacción química es transmitido a través de la pared de los tubos, por ello dT es nulo.

Integrando esta última expresión y cambiando de signo en ambos lados:

$$\frac{4F_{sul,o} U}{D} \int_0^{x_f} (T_m - T) \frac{dx_{sul}}{(-r_{sul})} = \frac{(\Delta \bar{H}_r) F_{sul,o}}{(-v_{sul})} \int_0^{x_f} dx_{sul} \quad [A1.92]$$

Como T es constante, el calor necesario para que el sistema sea isotérmico vendrá dado por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{4F_{sul,o} U (T_m - T)}{D} \int_0^{x_f} \frac{dx_{sul}}{(-r_{sul})} = \frac{(\Delta \bar{H}_r) F_{sul,o}}{(-v_{sul})} x_{sul,f} \quad [A1.93]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

A continuación se expone una tabla con el resumen de los cálculos realizados:

$F_{sul}[\text{mol/s}]$	6,08
$\Delta H_r[\text{KJ/mol}]$	70
$Q[\text{J/s}]$	425422,5

1.18.-Calor intercambiado y caudal de agua

Para retirar el calor vamos a emplear agua a una presión de 8 bares, ya que por normativa el fluido que circula por el lado de la carcasa debe encontrarse a una presión inferior al fluido que circula por los tubos, que recordamos que era de 10 bares. Dicha corriente de agua se alimentará a su temperatura de ebullición de manera que el calor retirado del reactor será empleado en el cambio de fase de agua a vapor del líquido refrigerante en cuestión.

El balance que se le apropia al agua conlleva la estimación del calor latente. El cambio en las propiedades físicas al tomar el calor del fluido, es debido a este calor.

El calor retirado por el fluido frío rige la siguiente ecuación:

$$Q = m_{H_2O} \cdot \lambda_{H_2O} \quad [\text{A1.94}]$$

Esta forma de retirar el calor es perfectamente válida y nos ahorra esfuerzos de cálculo así como nos aporta una mayor control a la hora de operar ya que al entrar agua saturada sólo consideramos el calor latente, de este modo la única variable a controlar es el caudal de agua refrigerante alimentada al sistema de refrigeración.

Recurrimos a la bibliografía para conocer el calor latente del agua en las condiciones de operación:

P[bar]	T[°C]	$v'[\text{m}^3/\text{kg}]$	$v''[\text{m}^3/\text{kg}]$	$\rho'[\text{kg}/\text{m}^3]$	$h'[\text{KJ}/\text{Kg}]$	$h''[\text{KJ}/\text{Kg}]$	$r[\text{KJ}/\text{Kg}]$	$S'[\text{KJ}/\text{Kg K}]$	$S''[\text{KJ}/\text{Kg K}]$
8	170,41	0,00115	0,2043	4,162	720,94	2767,5	2046,5	2,0457	6,6596

Tabla 12.-Características del agua saturada a 8 bares de presión

Donde:

v' : volumen específico del agua saturada

v'' : volumen específico del vapor saturado seco

h' : entalpía del agua saturada

h'' : entalpía del vapor saturado seco

r : calor de vaporización

s' : entropía del agua saturada

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

s'' : entropía del vapor saturado seco

Resolviendo la ecuación anteriormente expuesta se tiene los siguientes resultados.

$Q_{v \text{ reactor}} [\text{m}^3/\text{s}]$	0,020
$W_{\text{reactor}} [\text{kg/s}]$	15,81
$F_{\text{reactor}} [\text{mol/s}]$	6,08
$\Delta H_r [\text{KJ/mol}]$	70
$Q [\text{J/s}]$	425422,5
$r(\text{calor de vaporización}) [\text{KJ/Kg}]$	2046,5
$W_{\text{H}_2\text{O}} [\text{Kg/s}]$	0,21
$F_{\text{H}_2\text{O}} [\text{mol/h}]$	1946,68

1.19.-Propiedades de los fluidos

A continuación se exponen dos tablas que recogen las características de los fluidos de interés para el estudio de la transferencia de calor en nuestro sistema de reacción, que son el gasoil que circula por los tubos y el agua refrigerante que circula por la carcasa:

GASOIL	
Temperatura de entrada[°C]	320
Temperatura de salida[°C]	320
Temperatura media[°C]	320
Densidad media[kg/m ³]	795,98
Viscosidad media [kg/ms]	3,33E-04
Capacidad calorífica media[J/kgK]	1750
Conductividad media[W/mK]	0,15
Presión de operación en tubos[atm]	10

Tabla 13.-Propiedades del gasoil (VGO) alimentado al reactor

AGUA	
Temperatura de entrada[°C]	170,41
Temperatura de salida[°C]	170,41
Temperatura media[°C]	170,41
Densidad media[kg/m ³]	437,23
Viscosidad media [kg/ms]	4,48E-04
Capacidad calorífica media[J/kgK]	4379,5
Conductividad media[W/mK]	0,68
Presión de operación en carcasa[atm]	8,68

Tabla 14.-Propiedades del agua (fluido refrigerante)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Muchas de las propiedades expuestas se recogen directamente de la bibliografía, como podemos ver en las tablas que se recogen en el correspondiente anexo de tablas. Otras sin embargo han sido estimadas mediante correlaciones empíricas que se recogen en el libro "The Properties of gases and liquids", Bruce E. Polnig, John M. Prawnitz, John P. O'Connell, Ed. McGraw-Hill.

1.20.- Diferencia media logarítmica de la temperatura

La diferencia media logarítmica de temperatura se obtiene siguiendo el perfil real de temperaturas de los fluidos a lo largo del intercambiador, reactor en nuestro caso particular, y es una representación exacta de la diferencia de temperatura promedio entre los fluidos caliente y frío. Realmente refleja el decaimiento de la diferencia de temperatura local.

Para el cálculo de esta temperatura media logarítmica (ΔT_{ml}) se hace uso de la siguiente expresión, donde los subíndices C y F se refieren a las corrientes de fluido caliente y frío respectivamente, y los subíndices 1 y 2 para la entrada y la salida de intercambiador respectivamente.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{C2} - T_{F1}) - (T_{C1} - T_{F2})}{\ln \left(\frac{T_{C2} - T_{F1}}{T_{C1} - T_{F2}} \right)} \quad [A1.95]$$

Sustituyendo los valores de las temperaturas de los fluidos en esta última ecuación se tiene como resultado 0/0, ante esto recurrimos a la bibliografía y encontramos que se expone que en el caso de intercambiadores a contracorriente la diferencia de temperatura entre los fluidos caliente y frío permanecerá constante a lo largo del mismo cuando las razones de capacidad calorífica de los fluidos sean iguales (es decir, ΔT es constante cuando $C_c = C_f$). Entonces, se tiene que $\Delta T_1 = \Delta T_2$ y la diferencia de temperatura media logarítmica da $\Delta T_{ml} = 0/0$, la cual es una forma indeterminada. Mediante la aplicación de la regla de L'Hôpital, se puede demostrar que, en este caso, se tiene $\Delta T_{ml} = \Delta T_1 = \Delta T_2$, como era de esperar.

En nuestro caso los incrementos se hacen iguales por el hecho de que el proceso es isotérmico, siendo aplicable lo anterior obtendremos los siguientes resultados:

$T_{C1} [^{\circ}C]$	320
$T_{C2} [^{\circ}C]$	320
$T_{F1} [^{\circ}C]$	170,41
$T_{F2} [^{\circ}C]$	170,41
$\Delta T_{ml} [K]$	149,59

Como la configuración del reactor es un paso por tubos y otro por carcasa, no será necesario corregir esta temperatura.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.21.-Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor U

Para que la reacción se lleve a cabo de forma isotérmica en el reactor, el agua y los reactivos y productos fluyen separados por una pared sólida. El agua retendrá el calor que libera la reacción. Éste calor se transfiere del fluido hacia la pared de los tubos por convección, después a través de la pared por conducción y, por último, de la pared hacia el fluido frío de nuevo por convección. Los efectos de la radiación suelen incluirse en los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Esta red de resistencias térmicas contiene 2 resistencias a la convección (interna y externa de los tubos) y una a la conducción. La resistencia térmica total queda:

$$R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad [A1.96]$$

En este caso los subíndices i y o se refieren a la superficie interior y exterior de los tubos, respectivamente, por su significado en inglés, in y out. Para el intercambiador, se tiene que:

$$A_i = \pi D_i L \quad [A1.97]$$

$$A_o = \pi D_o L \quad [A1.98]$$

Además k es la conductividad térmica del material y L la longitud de los tubos, mientras que h_i y h_o son los coeficientes individuales de convección interior y exterior, respectivamente.

Resulta conveniente combinar todas las resistencias que se encuentran en la trayectoria del flujo de calor de fluido caliente hacia el frío en una sola resistencia R y expresar la velocidad de transferencia de calor entre los dos fluidos como:

$$Q = \frac{\Delta T_{ml}}{R} = UA\Delta T_{ml} = U_i A_i \Delta T_{ml} = U_o A_o \Delta T_{ml} \quad [A1.99]$$

Cancelando ΔT_{ml} , la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \quad [A1.100]$$

El rendimiento del intercambiador suele deteriorarse con el paso del tiempo como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencia de calor. La capa de depósitos representa una resistencia adicional para la transferencia y provoca una disminución de la misma. El efecto neto de estas acumulaciones se representa por un factor de incrustación R_f , el cual es una medida de la resistencia térmica introducida por la incrustación.

Este factor depende de la temperatura de operación, de la velocidad de los fluidos y de la duración del servicio. La incrustación se incrementa al aumentar la temperatura y disminuir

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

la velocidad según se comprueba en la experiencia. La relación del coeficiente global de transferencia de calor dada con anterioridad debe modificarse para tener en cuenta los efectos de la incrustación sobre la superficie interior y exterior del tubo. Para un intercambiador carcasa y tubo, se puede expresar como:

$$\frac{1}{UA} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}''}{A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}''}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad [A1.101]$$

El coeficiente global de intercambio de calor no tiene sentido a menos que se especifique el área sobre la cual se basa. Por ello, se expresará el coeficiente global de intercambio de calor referido al área exterior y en función del diámetro interior y exterior de los tubos.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o}{D_i} R_{f,i}'' + \frac{D_o \ln(r_o/r_i)}{2k_m} + R_{f,o}'' + \frac{1}{h_o} \quad [A1.102]$$

A continuación se hallará cada uno de los términos que se encuentran en esta última expresión para poder hallar el coeficiente global de transferencia de calor.

1.21.1.-Cálculo del coeficiente individual de película interna, h_i

El cálculo del coeficiente de película interna se puede realizar a partir de la expresión que define el número de Nusselt, que es un número adimensional que representa la mejora de transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa:

$$Nu_d = \frac{h_i D_i}{k} \quad [A1.103]$$

A su vez es necesario conocer otra correlación que depende del número de Reynolds (Re) y del Prandtl (Pr) y que es una ecuación empírica llamada Dittus-Boelter que se representa mediante una simple relación de la ley de las potencias:

$$Nu_d = 0,023 Re^{4/5} Pr^n \quad [A1.104]$$

Aunque viene representada en la bibliografía de muchas formas diferentes, se escoge esta porque se considera flujo turbulento. Con respecto a n, en este caso toma un valor de 0,3, ya que es el fluido que circula por los tubos el que cede el calor, en caso contrario n tomaría un valor de 0,4.

Conocido esto, se comenzará por el cálculo del Reynolds para la corriente que circula por el interior de los tubos mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{G D_i}{\mu} \quad [A1.105]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde μ es la viscosidad media en Pa·s y G es la velocidad másica en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y viene dado por la siguiente expresión:

$$G = \frac{4m_T n_T}{\pi D_i^2 N_T} \quad [\text{A1.106}]$$

Donde:

m_T : Caudal másico total que circula por los tubos

D_i : Diámetro interno de los tubos

N_T : número de tubos

n_T : número de pasos por tubo

μ : viscosidad media

Por su parte, el número de Prandtl será calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \quad [\text{A1.107}]$$

Como se aprecia se calcula a partir de las propiedades medias del fluido circulante por los tubos.

Conocidos todos estos datos se procede a calcular el número de Nusselt. A continuación se expone una tabla resumen con los resultados de los cálculos:

m_t (caudal másico total tubos)[Kg/s]	31,62
n_t (nº de pasos por tubo)	1
D_i (diámetro interno de los tubos)	0,0973
N_t (nº de tubos)	815,24
G (velocidad másica)[Kg/m ² s]	5,22
μ (viscosidad media)[Pa·s]	3,33E-04
Re [adim]	1522,684
C_p (capacidad calorífica)[J/kgK]	1750
K (conductividad)[W/mK]	0,15
Pr [adim]	3,89
n (cte bibliográfica)	0,3
Nu_d (Dittus-Boelter)	12,15
h_i [W/m ² K]	18,74

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.21.2.-Cálculo del coeficiente individual de película externa, h_o

El cálculo del coeficiente de película externa del lado de la carcasa es bastante más complejo que el correspondiente al lado de los tubos. Un método válido para la ocasión que se nos presenta es el de Kern.

El número de Nusselt se corresponde ahora con la misma expresión que en el apartado anterior pero referido a las dimensiones exteriores:

$$Nu_d = \frac{h_o D_o}{k} \quad [A1.108]$$

Para el flujo que circula por el exterior de los tubos se puede utilizar la fórmula de Churchill y Berstein que cubre todo el rango de Re y se recomienda para $Re \cdot Pr > 0,2$:

$$Nu_d = 0,3 + \frac{0,62 Re^{0,5} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad [A1.109]$$

Calculamos ahora el Re y el Pr:

$$Re = \frac{GD_c}{\mu} \quad [A1.110]$$

Donde μ es la viscosidad media del agua en Pa·s y G es la velocidad másica en $Kgm^{-2}s^{-1}$ y D_c el diámetro de carcasa en m:

$$G = \frac{4m_{H_2O}}{\pi(D_c^2 - N_T D_o^2) X} \quad [A1.111]$$

Siendo:

m_{H_2O} : caudal másico que circula por los tubos

D_c : diámetro de carcasa

N_T : número de tubos

El número de Prandtl se calculará con la misma expresión pero con los datos de las propiedades del agua.

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad [A1.112]$$

Conocidos estos datos se procede a calcular el número de Nusselt a partir de la ecuación A1.108 y con esto ya podemos obtener el valor del coeficiente de película interna. A

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

continuación se expone una tabla con los resultados obtenidos tras la realización de los cálculos:

m_{H_2O} (caudal másico total tubos)[Kg/s]	0,21
nt(nº de pasos por tubo)	1
D_{io} (diámetro interno de los tubos)	0,0973
N_t (nº de tubos)	815,24
D_c (Diámetro de carcasa)	4,05
D_o (diámetro externo de los tubos)	0,1
X(relación pitch/diámetro ext tubos)	1,25
G(velocidad másica)[Kg/m ² s]	0,026
μ (viscosidad media)[Pa·s]	4,48E-04
Re[adim]	232,11
C_p (capacidad calorífica)[J/kgK]	4379,5
K(conductividad)[W/mK]	0,68
Pr[adim]	2,88
Nu_d	13,09
h_o [W/m ² K]	89,02

1.21.3.-Factores de incrustación interno $R''_{f,i}$ y externo $R''_{f,o}$

Para el caso de estudio los factores de incrustación (Fouling Factor) son $R''_{f,o}=0,0002\text{m}^2\text{°CW}^{-1}$ y $R''_{f,i}=0,00001\text{m}^2\text{°CW}^{-1}$ recomendados por la normativa TEMA en la sección 10.

1.21.4.- Conductividad térmica del material

Para hallar la resistencia a la conducción, es necesario conocer la conductividad térmica del material.

Como antes se comentó el material de los tubos es acero inoxidable TP 347L y su conductividad depende de la temperatura máxima a la que fluye la corriente. Según los datos recogidos en la 3ª edición de Alan J. Chapman, titulado "Transmisión de Calor" se obtiene una conductividad de $K_m=24,4\text{ W/mK}$.

Conocidos ya los valores de los coeficientes individuales de película, tanto interna como externa, los factores de incrustación, y la conductividad térmica del material, se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor a partir de las resistencias dadas.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

D_o (diámetro externo de los tubos)[m]	0,1
h_i (coef individual de pel interna)[W/m ² K]	18,74
D_i (diámetro interno de los tubos)[m]	0,097
$R''_{f,i}$ (factor de incrustación interno)[m ² °C/W]	0,00035
r_o (radio exterior tubos)[m]	0,05
r_i (radio interior tubos)[m]	0,049
K_m (conductividad media)[W/mK]	24,4
$R''_{f,o}$ (factor de incrustación externo)[m ² °C/W]	0,0001
h_o (coef individual de pel externa)[W/m ² K]	89,02
$1/U_o$ [Km ² /W]	0,0456
U_o [W/m ² K]	21,927

1.22.-Área de intercambio necesaria

Cuando se realizó el balance de energía se introdujo la ecuación de la velocidad de transferencia de calor, y es a partir de ella como se calculará el área necesaria para poder transferir ese calor de un fluido a otro. Retomamos pues la expresión obtenida que quedó expresada de forma análoga a la ley de Newton de enfriamiento:

$$Q = UA\Delta T_{ml} \quad [A1.113]$$

Siendo:

Q: velocidad de transferencia de calor expresado en Js⁻¹

U: coeficiente global de transferencia de calor en Wm⁻²K⁻¹

A: Área necesaria para la transferencia de calor en m²

ΔT_{ml} : diferencia de temperatura media logarítmica entre los fluidos en K

Despejando el área de la expresión anterior obtendremos el área de intercambio necesaria en nuestro sistema de reacción:

Q(veloc trans calor)[J/s]	425422,5
U(coef. global transf)[W/m ² K]	21,927
ΔT_{ml} [K]	149,59
A[m ²]	129,70

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.23.-Número de tubos necesarios

Elegidas las dimensiones y conociendo el área de intercambio es muy sencillo hallar el número de tubos.

El área de un solo tubo viene dada por la ecuación:

$$A_{tubo} = \pi D_o L \quad [A1.114]$$

Si dividimos el área de transferencia necesaria previamente calculada por el área de un tubo, entonces obtendremos el número de tubos necesarios para que se de esta transferencia de calor:

$$N_T = \frac{A_s}{A_{tubo}} \quad [A1.115]$$

Una vez realizados los cálculos es conveniente comprobar que se supera el número de tubos necesarios ya que en caso contrario debemos tomar nuevas medidas para retirar el calor, además de comprobar los cálculos. En nuestro caso obtuvimos los siguientes resultados:

D _o (diam externo)	0,1
L(longitud)	5,076
A _{1tubo} (superficie un tubo)	1,59
A _s (área total)	129,70
N _t (número de tubos necesarios)	81,34

Comprobando así que, al ser menos tubos que los que se estimaron al principio, la transferencia de calor se realizará sin ningún inconveniente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.24.-Nomenclatura

a: número adimensional

a_L : área interfacial gas-líquido, cm^{-1}

a_s : área interfacial sólido-líquido, cm^{-1}

A_c : área superficial, cm^2

API: Instituto Americano del Petróleo

$C_{H_2}^L$: concentración de hidrógeno en la fase líquida, mol/cm^3

$C_{H_2S}^L$: concentración de sulfuro de hidrógeno en la fase líquida, mol/cm^3

C_{sul}^L : concentración de azufre en la fase líquida, mol/cm^3

$C_{H_2}^S$: concentración de hidrógeno en la fase sólida, mol/cm^3

$C_{H_2S}^S$: concentración de sulfuro de hidrógeno en la fase sólida, mol/cm^3

C_{sul}^S : concentración de azufre en la fase sólida, mol/cm^3

$D_{e_{sul}}$: difusividad efectiva para el azufre en los poros de catalizador, cm^2/s

d_c : diámetro de las partículas de catalizador cilíndricas, cm

$D_{H_2}^L$: difusividad molecular del H_2 en el líquido, cm^2/s

D_{sul}^L : difusividad molecular del azufre en el líquido, cm^2/s

DR: diámetro del reactor, cm

d_s : diámetro de partícula de catalizador esféricas, cm

EA_{HDS} : energía de activación para el proceso de HDS, J/mol

G_L : velocidad másica del líquido, $\text{g}/\text{cm}^2 \text{ s}$

HDS: hidrodesulfuración

h_{H_2} : coeficiente de Henry para el hidrógeno, $\text{MPa cm}^3/\text{mol}$

h_{H_2S} : coeficiente de Henry para el sulfuro de hidrógeno, $\text{MPa cm}^3/\text{mol}$

K_{HD} : constante de reacción HDS, $(\text{mol}/\text{cm}^3)^{1-n} (\text{cm}^3/\text{g s}) (\text{mol}/\text{cm}^3)^{-m}$

K_{H_2S} : constante de equilibrio de adsorción del H_2S , cm^3/mol

$K_{H_2}^L$: coeficiente de transferencia de materia gas-líquido para el hidrógeno, cm/s

$K_{H_2S}^L$: coeficiente de transferencia de material gas-líquido para el sulfuro de hidrógeno, cm/s

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$K_{H_2}^S$: coeficiente de transferencia de material líquido-sólido para el H_2 , cm/s

$K_{H_2S}^S$: coeficiente de transferencia de material líquido-sólido para el H_2S , cm/s

K_{sul}^S : coeficiente de transferencia de material líquido-sólido para el azufre, cm/s

L: longitud de partícula, cm

L: longitud de partícula cilíndrica de catalizador, cm

LHSV: velocidad espacial del líquido, h^{-1}

m: orden de reacción del hidrógeno

n: orden de reacción de azufre

M_w : peso molecular

P: presión total del reactor, psia

$P_{H_2}^G$: presión parcial del hidrógeno, MPa

$P_{H_2S}^G$: presión parcial del sulfuro de hidrógeno, MPa

r: radio de partícula, cm

r_g : radio de poro, cm

rHDS: velocidad de reacción HDS por unidad de masas de catalizador, $mol/g \cdot s^{-1}$

R: constante universal de los gases, J/molK

S_g : superficie específica de partícula, cm^2/g

S_p : área externa total de partícula, cm^2

SSE: error cuadrático media

sp.gr15.6: gravedad específica del gasóleo a 15,6 °C

T_{meABP} : temperatura media de ebullición, °R

TBR: reactor trickle-bed

u_g : velocidad del gas, cm/s

u_L : velocidad del líquido, cm/s

v: volumen, cm^3

V_g : volumen de poros por unidad de masa de catalizador, cm^3/g

V_{H_2} : volumen molar del gas H_2 en condiciones normales, NI/mol

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

V_{H_2S} : volumen molar del gas H_2S en condiciones normales, NI/mol

V_p : volumen total de catalizador, cm^3

z : longitud del lecho de catalizador, cm

→ Letras griegas empleadas

ρ_B : densidad aparente de las partículas de catalizador, g/cm^3

ρ_L : densidad del líquido en las condiciones de operación, lb/ft^3

$\rho_{15.6}$: gravedad específica del gasóleo a 15.6 °C

ρ_{20} : densidad del gasóleo a 20 °C, g/cm^3

ρ_0 : densidad del gasóleo a 15.6 °C y 101,3kPa, lb/ft^3

ρ_p : densidad de partícula, g/cm^3

η : factor de eficacia del catalizador

η_{HDS} : factor de eficacia del proceso de HDS

ϵ : porosidad del lecho catalítico

μ_L : viscosidad del líquido en las condiciones de operación, mPas

u^L_c : volumen específico crítico del gasóleo, ft^3/mol

$u^{H_2}_c$: volumen específico crítico del H_2 , cm^3/mol

$u^{H_2S}_c$: volumen específico crítico del H_2S , cm^3/mol

u_L : volumen específico del gasóleo, cm^3/mol

u_{H_2} : volumen específico de H_2 , cm^3/mol

u_{H_2S} : volumen específico de H_2S , cm^3/mol

u_{sul} : volumen molar del azufre, cm^3/mol

λ_{H_2} : coeficiente de solubilidad de H_2 , $NIkg^{-1} MPa^{-1}$

λ_{H_2S} : coeficiente de solubilidad de H_2S , $NIkg^{-1} MPa^{-1}$

Δp_p : densidad en función de los cambios de presión, lb/ft^3

Δp_T : densidad en función de la temperatura, lb/ft^3

ϕ : módulo de Thiele

θ : porosidad de partícula

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

τ : factor de tortuosidad

→ Superíndices

°: grado Celsius

G: fase gaseosa

H₂: hidrógeno

H₂S: sulfuro de hidrógeno

L: fase líquida o interfase gas-líquido

S: fase sólida o interfase líquido-sólido

→ Subíndices

0: a la entrada del reactor (condiciones iniciales)

c: cilíndrico

f: al final del reactor (condiciones finales)

g: gas

H₂: hidrógeno

H₂S: sulfuro de hidrógeno

L: líquido

S: esférico

sul: azufre

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ANEXO 2. DISEÑO DEL HORNO DE PROCESOS

2.1.-Introducción

Se pretende en este punto estudiar el diseño del horno industrial que servirá para calentar las corrientes de materia prima a una mayor temperatura debido a que ninguna otra corriente calefactora puede alcanzar los 593,15 K, temperatura necesaria en el reactor químico para el proceso de interés.

Las corrientes de materia prima, gasoil por un lado e hidrógeno por otro, serán calentadas en el mismo horno pero en corrientes independientes. Éstas entran separadas al horno debido a la reactividad que presentan sus componentes y su temperatura de entrada es de 293,15 K. Ambas se introducen a la misma temperatura para facilitar los cálculos.

Se selecciona un horno industrial tipo caja (Box Heaters) con doble cámara y zona convectiva común. El combustible utilizado es gas natural y el exceso de aire utilizado se fijará en un 10%.

Durante este anexo, se irá calculando paso a paso el diseño propio a un horno, pero para no hacerlo tan tedioso, se calculará lo relativo a una de las corrientes, la de gasoil, y sólo se expresarán los datos, también calculados, de la corriente de hidrógeno.

2.1.1.-Normativa

Este equipo está diseñado bajo el código Estándar API 560 “Fired Heater for General Refinery Services” donde se han consultado y seguido todas las especificaciones. Además, tanto para el dimensionamiento como el detalle en los cálculos de los tubos del horno de procesos y su material se ha seguido el código estándar API 530 “Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries”.

2.2.-Tipo de horno

El horno elegido es un tipo *caja con doble cámara y zona convectiva común*. Es de sección recta y normalmente los tubos se instalan en posición horizontal.

Consiste en 6 paredes (2 son internas), dos suelos y un techo de acero con aislamiento interior de ladrillos refractarios. Este horno tiene la parte superior de la cámara radiante horizontal al contrario que los de tipo *cabina* que es inclinada. Esta parte del horno recibe el nombre de arco (en inglés *arch*), y en el horno objeto de diseño los tubos se disponen en las paredes laterales y en el arco.

La eficiencia energética de un horno, por lo general es baja, así que se instala un haz de tubos en el camino de salida de los gases, antes de que estos pasen a la chimenea. Debido a

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

que estos gases ya se han enfriado, el mecanismo predominante en esta zona es la convección. Por tanto, la sección de convección se sitúa en la parte superior y seguidamente se monta la chimenea.

Además en este tipo de hornos usualmente se pueden usar tubos más largos que en otros tipos ya que también se disponen horizontalmente en esta zona. Es por esta razón por la que se diseñará este horno tipo *caja*, ya que se utilizan caudales muy grandes.

A fin de aprovechar mejor las diferencias de temperatura, el fluido de proceso ingresa primero en la zona convectiva, y luego pasa a la zona radiante, circulando a contracorriente de los humos o gases de combustión. La sección de tubos que corresponde al paso de la zona radiante a la convectiva recibe el nombre de tubos de choque.

Para lograr una alta densidad de flujo de energía radiante, es necesaria una buena emisividad del gas, que es una función del volumen, por lo tanto, es necesario que la cámara sea de gran tamaño.

Para generar el calor, tanto en la parte radiante como en la zona de convección se utilizan unos quemadores (*burners*) donde se quema el combustible que circulará por el interior del horno cediendo el calor a los tubos. Estos se soportarán en el piso, que es la parte de abajo del horno.

Como se introdujo, el horno actuará con un 10% de aire en exceso, cantidad recomendada para trabajar con una mejor eficiencia energética.

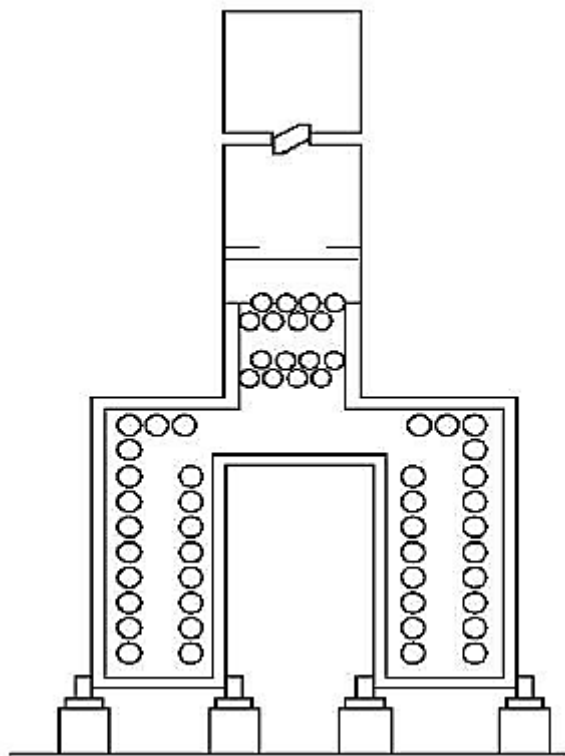


Figura 1.-Horno tipo caja con doble cámara

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.3.-Balance de energía

Se realiza un balance de energía para calcular el calor que es necesario aportar para conseguir aumentar la temperatura del sistema. Como son dos corrientes independientes, el calor necesario será la suma de los calores que cada corriente retiene.

La ecuación que permite el cálculo de dicho calor es la siguiente:

$$Q = mC_p (T_{sal} - T_{ent}) \quad [A2.1]$$

Donde:

m: Caudal molar (kmol/h)

C_p: Capacidad calorífica media (J/mol·K)

T_{sal}: temperatura de salida del fluido (K)

T_{ent}: temperatura de entrada del fluido (K)

A continuación se exponen los datos de ambas corrientes en la siguiente tabla:

	Corriente Gasoil	Corriente Hidrógeno
Caudal molar[kmol/h]	915,84	1074,57
Cp[J/kmol·K]	672752,5	29354,52
T _{ent} [K]	293,15	293,15
T _{sal} [K]	593,15	593,15

Sustituyendo estos datos en la ecuación del balance de cada corriente por separado, el calor necesario para aumentar la temperatura del sistema hasta 593,15 K es:

Q _{necesario gasoil} [J/h]	6,02E+10
Q _{necesario hid/met} [J/h]	9,46E+09

Y sumando así las dos contribuciones de calor, se tiene un total de:

Q _{necesario total} [J/h]	6,96E+10
------------------------------------	----------

2.4.-Temperatura de salida de los gases (T_{stack}) y eficiencia del horno

Por razones de diseño, la temperatura de salida de los gases de combustión por la chimenea ha de ser entre 25 y 40 °C superior al fluido de entrada al horno. Para el diseño que se lleva a cabo, se toma el valor superior de 40°C (313K). Por tanto la temperatura de salida de gases por la chimenea es de:

$$T_{stack} = T_{sal} + 313[K] \quad [A2.2]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por otro lado, se define la eficiencia del horno como el porcentaje del calor liberado en la llama que es absorbido por el fluido calentado. Los valores van del 70 al 95%. Las ineficiencias se deben a las pérdidas de calor en las paredes del horno (un 2% es un valor aceptable en el diseño) y a las pérdidas en los gases producidos.

Como la composición de los gases de combustión no varía mucho, se encuentra en la bibliografía "Diseño de equipos e instalaciones. Universidad de Salamanca" una ecuación para determinar las pérdidas del horno bastante exacta. La fórmula siguiente está dada para un 2% de pérdidas por la pared y para combustibles gaseosos.

$$Eff = 0,98 - 9,25 \cdot 10^{-5} T_{stack}^{1,128} \left(1 + \frac{ex_{aire}}{100} \right)^{0,748} \quad [A2.3]$$

Donde:

Eff: eficiencia del horno

T_{stack}: temperatura de salida de los gases por chimenea (°F)

Ex_{aire}: porcentaje de exceso de aire, 10%

Sustituyendo los datos en la ecuación ya expuesta se tiene una eficiencia de:

Tstack[K]	606,3
Tstack[°F]	631,7
Exceso aire	0,1
Eficiencia	0,85

Una eficiencia del 85% está dentro del intervalo de eficiencia permisible, luego tomaremos este valor como válido.

2.5.-Calor liberado

El calor liberado por los quemadores no es más que el calor necesario para el proceso dividido por la eficiencia del horno.

$$Q_{liberado} = \frac{Q_{necesario}}{Eff} \quad [A2.4]$$

Este valor va a ser necesario en cálculos posteriores por lo que expondremos una tabla con sus valores para cada una de las corrientes.

Corriente	Calor liberado[kJ/s]
Gasoil	19746,25
Hid/met	3105,22
Total	22851,48

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.6.-Cantidades requeridas de combustible y aire

Considerando como combustible el gas natural, se calculará a continuación la cantidad requerida para calentar el sistema a la temperatura considerada. Por otro lado, conociendo que el exceso de aire es del 10%, también se dará a conocer la cantidad empleada.

2.6.1.-Cantidad de combustible

Para hallar esta cantidad, es necesario conocer el Poder Calorífico, que es la cantidad de calor que se libera en la combustión completa de una unidad de combustible. En general para combustibles gaseosos, su determinación se hace en Calorímetros de Flujo, donde se mide el calor de los gases de combustión enfriándolos hasta hacer condensar el vapor de agua que contiene, que aparecerá líquida, por lo que el valor medido incluirá el calor latente de condensación, es el denominado Poder Calorífico Superior(PCS).

Realmente, en este caso, como la temperatura de evacuación de los gases a la chimenea es normalmente mayor que la correspondiente a condensación, el vapor de agua no se condensa, por ello se define también el Poder Calorífico Inferior (PCI) que se obtiene a partir del anterior, restándole el calor latente de condensación del vapor de agua. Este vapor de agua es el formado en la combustión del hidrógeno.

Para conocer la cantidad de combustible requerido en el proceso se utiliza la siguiente expresión:

$$W_{combustibletotal} = \frac{Q_{liberado} (kJ / s)}{PCI(kJ / kg)} \quad [A2.5]$$

El gas natural contiene metano, etano y menores cantidades de propano, butano, pentano y nitrógeno; pero en su composición en mayor medida contiene sobre todo metano; por lo general más de un 90%. Por ello, para facilitar los cálculos, se considerará que el gas natural que va al proceso en cuestión es 100% metano.

Para conocer el PCI del metano, se recurre a la bibliografía (J.P. Wauquier, 1993).

$$PCI_{metano} = 50000 kJ / kg$$

Si utilizamos en vez del calor liberado total, el calor liberado para cada corriente, obtendremos el caudal de combustible necesario para cada una de las corrientes de interés. La suma de ambos caudales da como resultado el caudal total de combustible necesario para que horno realice su función adecuadamente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Corriente	Wmetano[kg/s]
Gasoil	0,395
Hid/met	0,062
Total	0,457

2.6.2.-Cantidad de aire necesaria para la combustión

Para aportar el oxígeno necesario para la combustión se utiliza aire atmosférico. Su composición no es estrictamente fija, ya que su contenido de vapor de agua (pequeño) es variable con el día del año.

Es necesario aportar un exceso de aire para que se realice completamente la combustión. Teniendo en cuenta que el exceso de aire que se impuso desde un primer momento es de un 10%, se procede a conocer la cantidad de aire requerida para la combustión.

La reacción química que representa el proceso de combustión es la siguiente:



Como se aprecia en esta reacción, los moles de oxígeno necesarios, también llamado oxígeno estequiométrico o mínimo, son del doble de los moles de metano para la combustión completa del mismo. Considerando el peso molecular de los compuestos (oxígeno y metano), se puede calcular el caudal molar de oxígeno necesario.

Compuestos	Peso molecular[kg/kmol]
Metano	16
Oxígeno	32
Aire	28,84

Es en el aire seco donde está contenido el oxígeno mínimo. La proporción de oxígeno en este aire es de 21% y el 79% restante es nitrógeno. Por tanto la cantidad mínima (estequiométrica) de aire seco se determina como:

$$m_{Aire\ min} = 4,762 m_{oxígeno} \quad [A2.6]$$

El exceso de aire será de un 10%, por lo que podemos conocer ese caudal de modo muy sencillo aplicando:

$$m_{Aire\ exceso} = (ex_{aire} - 1) m_{Aire\ min} \quad [A2.7]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En la siguiente tabla se recogen los resultados tras realizar estos cálculos:

$m_{\text{oxígeno}}[\text{kmol/s}]$	5,71E-02
$m_{\text{aire min}}[\text{kmol/s}]$	2,72E-01
$m_{\text{aire exceso}}[\text{kmol/s}]$	2,72E-02

2.6.3.-Relación aire-combustible

Una vez conocidas las cantidades de combustible y aire requerido, se puede conocer la relación aire-combustible. Esta relación será una relación de caudales másicos, de la cual más adelante se hará uso.

El caudal de aire másico tiene en cuenta el peso molecular, por tanto, la relación aire-combustible se determina con el siguiente cociente:

$$G = \frac{W_{\text{Aire min}}}{W_{\text{combustible}}} \quad [\text{A2.8}]$$

Los valores obtenidos para estos parámetros se recogen en esta tabla:

$W_{\text{aire min}}[\text{kg/s}]$	7,85
$W_{\text{aire}}[\text{kg/s}]$	8,63
$G(\text{relación aire-comb})$	17,17

Se comprueba que el valor obtenido para la relación aire-combustible es un valor típico para este tipo de combustible según se recoge en la bibliografía.

2.7.-Velocidad del fluido y dimensiones de los tubos

Cada corriente de materia prima pasa por tubos con diferente diámetro ya que son caudales diferentes, por ello, la velocidad másica de cada fluido será distinta. Se procede a continuación al cálculo de dichos términos.

La selección del tubo apropiado en el diseño del horno es difícil. El diámetro nominal del tubo no debe ser mayor de 10 pulgadas, deben ser lo más largos posibles (limitados a 100 ft) y la velocidad dentro del tubo ha de ser elevada.

Cuando los fluidos a calentar son gases deben tener presente una regla básica: Con flujos de 100% vapor la velocidad se tomará como el 70% de la velocidad del sonido. La velocidad del sonido se rige por la siguiente ecuación:

$$\frac{G_{\text{max}}}{P} = 20,788 \sqrt{\frac{kM}{T}} \quad [\text{A2.9}]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Siendo:

K: la relación C_p/C_v

M: Peso molecular del fluido (kg/kmol)

P: presión de salida (psi)

T: Temperatura de salida del fluido (°R)

G_{max} : Velocidad másica crítica o velocidad sónica (lb/sft²)

Para obtener el valor de la capacidad calorífica a volumen constante, C_v , se hace uso de la relación de Mayer:

$$C_p - C_v = R$$

Donde:

C_p : capacidad calorífica a presión constante (J/kmolK)

C_v : Capacidad calorífica a volumen constante (J/kmolK)

R: constante universal de los gases (J/kmolK). Expresada en esas unidades $R=8314$

Se calcula, a continuación, la velocidad sónica de cada corriente:

→ Corriente de hidrógeno/metano

Para llevar a cabo el diseño debemos tener en cuenta la pérdida de carga, presión y temperatura de salida que se dan en esa sección del horno.

Determinaremos C_v , conocida esta k y con ambos nos disponemos a determinar el valor de G_{max} . Todos estos cálculos se realizan empleando las ecuaciones que se expusieron anteriormente.

Durante los cálculos debemos tener en cuenta que la corriente hidrógeno/metano tiene una relación molar de 95/5 %. Por lo que:

$$C_p = X_{hidrógeno} \cdot C_{p,hidrógeno} + X_{metano} \cdot C_{p,metano} \quad [A2.10]$$

Tras seguir los pasos que se han indicado más arriba tenemos los siguientes valores para los parámetros de interés:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Cp[J/kmolK]	29354,517
Cv[J/kmolK]	21040,517
k[adim]	1,395
M[kg/kmol]	2,7
P[psi]	146,96
G _{máx} [lb/s·ft ²]	181,46
R[J/kmolK]	8314
T[°R]	1067,67
G[lb/s·ft ²]	127,02

Una vez hallado este dato, fundamental para los cálculos posteriores, se calculará la sección total de tubos por donde circularán los fluidos. Con estas dimensiones se podrá calcular la velocidad real del fluido por el interior de los tubos.

Pues bien, como anteriormente se consiguió calcular la velocidad de flujo por los tubos, se puede estimar ahora la sección de tubos total dividiendo el caudal entre la velocidad:

$$A = \frac{W_{hid/met}}{G_{hid/met}} \quad [A2.11]$$

Conocida esta sección, se puede hallar el diámetro nominal ya que el área que se calcula se corresponde con la siguiente expresión:

$$A = \frac{\pi D_{nom}^2}{4} \quad [A2.12]$$

Según las especificaciones, se elige un diámetro inmediatamente superior al del resultado. Además para este tipo de procesos las velocidades rondan entre los 35 y 200 lbs¹ ft⁻². Por ello es necesario aumentar el diámetro por donde pasa el fluido, para así establecer el valor que nos interese.

W _{hid/met} [lb/s]	1,776
A[ft ²] secc tubos	0,014
D _{nom} [ft]	0,133
D _{nom} [ft]-corregido-	0,133
D _{nom} [in]-corregido-	1,60

Para tubos de hornos de procesos este diámetro no coincide con el diámetro exterior. Por tanto hay que recurrir a las **tablas A8.11** del anexo para buscar el diámetro exterior que tienen los tubos del horno de la zona de radiación. Éste finalmente toma un valor de:

Do[in]	2,375
Do[mm]	60,325

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Para calcular el diámetro interior y así la sección total real que contienen los tubos, es necesario conocer el espesor que tendrán dichos tubos, por ello escogeremos entre dos posibles espesores.

El primero de ellos, es el espesor mínimo que este tipo de materiales debe soportar. El material elegido para los tubos es el acero inoxidable 316L, un acero austenítico.

Tube outside diameter		Minimum thickness			
		Ferritic steel tubes		Austenitic steel tubes	
mm	(in)	mm	(in)	mm	(in)
60,3	(2,375)	3,4	(0,135)	2,4	(0,095)
73,0	(2,875)	4,5	(0,178)	2,7	(0,105)
88,9	(3,50)	4,8	(0,189)	2,7	(0,105)
101,6	(4,00)	5,0	(0,198)	2,7	(0,105)
114,3	(4,50)	5,3	(0,207)	2,7	(0,105)
141,3	(5,563)	5,7	(0,226)	3,0	(0,117)
168,3	(6,625)	6,2	(0,245)	3,0	(0,117)
219,1	(8,625)	7,2	(0,282)	3,3	(0,130)
273,1	(10,75)	8,1	(0,319)	3,7	(0,144)

Tabla 1.-Relación entre el diámetro externo y el espesor de los tubos del horno

Por la tabla expuesta conocemos el valor del espesor mínimo para nuestro caso particular:

Espesor min[in]	0,095
Espesor min[mm]	2,4

El segundo de los espesores es el hallado por las tensiones de rotura. Según la normativa API 530, el espesor se calcula rigiéndose a la siguiente ecuación:

$$\delta_{\sigma} = \frac{P_r D_o}{2\sigma_r + P_r} \quad [A2.13]$$

Donde:

δ_{σ} : Espesor (mm)

σ_r : Tensión de rotura (MPa)

D_o : diámetro externo(mm)

P_r : presión máxima de diseño (MPa)

Como se ha visto en los diferentes anexos de este proyecto la presión de diseño es un 10%superior a la presión de operación:

$$P_r = 1,1P \quad [A2.14]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Sustituyendo tenemos:

Pr[Mpa]-P máx de diseño-	1,115
--------------------------	-------

Por su parte, la tensión de rotura es hallada gráficamente en función de la temperatura de diseño. La temperatura de diseño es 20°C más que la temperatura de operación más alta en el sistema, que es la temperatura de salida de los tubos.

T _D [°C]	340
T _D [°F]	644

La tensión de rotura se calcula haciendo uso de la **figura A8.3** correspondiente al acero 316H.

δσ[mm]-espesor-	0,476
σr[Mpa]-tensión rotura-	70

Una vez determinados todos estos datos y calculado el espesor debemos tener en cuenta que es necesario añadir otro término que se encargará de cubrir los problemas de corrosión al material, por lo que debemos modificar el valor que habíamos calculado, para esto empleamos la ecuación:

$$\delta_{\sigma, \min} = \delta_{\sigma} + f_{\text{corr}} C \quad [\text{A2.15}]$$

Siendo:

δ_{σ, min}: espesor mínimo (mm)

δ_σ: espesor (mm)

f_{corr}: factor de corrosión

C: corrosión admisible (mm)

La corrosión admisible para aceros austeníticos según el código API 530 es de C=1mm (0,040in).

El factor de corrosión se muestra en la **figura A8.4 del anexo 8** y es función de n y B. Donde n, que es el exponente de rotura a la temperatura de diseño del acero, también viene representada en la figura A8.4 del mismo anexo.

B por su parte es el cociente entre la corrosión permisible y el espesor y puede expresarse como:

$$B = \frac{C}{\delta_{\sigma}} \quad [\text{A2.16}]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Sustituyendo valores en las ecuaciones y siguiendo los pasos indicados se obtienen los siguientes resultados:

$\delta\sigma, \text{min [in]}-\text{espesor mínimo}-$	0,050
$\delta\sigma, \text{min [mm]}-\text{espesor mínimo}-$	1,271
$\delta\sigma[\text{mm}]-\text{espesor}-$	0,476
factor corrosión	0,795
C[mm]-corr admisible-	1
B[adim]	2,099

Llegados a este punto nos quedaremos con el mayor de los espesores calculados por cuestiones de diseño, no debemos olvidar que una vez elijamos el valor calculado que más conviene debemos acudir a la **tabla A8.11** para seleccionar un valor comercial, que será el inmediatamente superior al valor calculado.

Hallado el correspondiente espesor, se puede calcular el diámetro interno por el que pasa la corriente bajo estudio, teniendo en cuenta las siguientes expresiones:

$$D_i = D_o - 2\delta \quad [\text{A2.17}]$$

$$A_{real} = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad [\text{A2.18}]$$

$$G_{fluido} = \frac{W_{fluido}}{A} \quad [\text{A2.19}]$$

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos:

$\delta[\text{in}]$	0,26
$\delta[\text{mm}]$	6,60
$D_o[\text{mm}]$	60,325
$D_i[\text{mm}]$	47,117
$D_i[\text{in}]$	1,855
$A_{real}[\text{in}^2]$	2,70
$A_{real}[\text{ft}^2]$	0,0188
$G_{hid/met} \text{ real}[\text{lb/s}\cdot\text{ft}^2]$	94,725

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

→ Corriente de gasoil

Siguiendo los mismos pasos de cálculo para la corriente de gasoil se obtuvieron los siguientes resultados:

CORRIENTE GASOIL	
$W_{\text{gasoil}}[\text{lb/s}]$	70,174
$D_{\text{nom}}[\text{in}]$ -corregido-	10
$D_o[\text{in}]$	10,75
$D_o[\text{mm}]$	273,05
$\sigma_r[\text{Mpa}]$ -tensión rotura-	70
$\delta_o[\text{mm}]$ -espesor-	2,157
factor corrosión	0,615
$C[\text{mm}]$ -corr admisible-	1
$\delta[\text{mm}]$ -elegido-	12,7
$D_i[\text{mm}]$	247,65
$D_i[\text{in}]$	9,75
$A_{\text{real}}[\text{in}^2]$	74,662
$A_{\text{real}}[\text{ft}^2]$	0,518
$G_{\text{gasoil real}}[\text{lb/s}\cdot\text{ft}^2]$	135,452

2.8.-Diseño de la sección de radiación

Como se definió al comienzo de este anexo, el horno dispondrá de dos secciones, la de radiación y la de convección. Se procederá a continuación al desarrollo del diseño de la primera de ellas.

2.8.1.-Estimación del flujo de energía radiante

El primer paso para el diseño de la zona radiante es seleccionar la densidad promedio de flujo de calor radiante. Es decir, la cantidad de calor por unidad de tiempo y de área que reciben los tubos. Esta se define como el cociente entre el calor total entregado al fluido de proceso en la zona radiante dividido por el área exterior de los tubos.

Cuanto mayor es este calor radiante menor será la superficie de transferencia de calor, menor será el tamaño del horno y menor será su coste. Para el diseño de esta zona de radiación, es necesario seguir un importante y ordenado proceso en los cálculos. De momento, por razones de diseño, se toma un valor de flujo de calor, q , acorde al servicio que se realiza.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Servicio	q (Btu/h·ft ²)
Precalentamiento de gases	10000
Precalentamiento de nafta	12000
Mezcla de gas y nafta	12000
Destilación de crudo	10000-12000
Destilación a vacío	80000-12000

Tabla2.-Flujo de calor necesario según el servicio que presta el horno

Para el servicio que se pretende en el presente Proyecto Fin de Carrera, es decir, el precalentamiento de mezcla de gases y nafta antes de su entrada al reactor, el flujo de energía radiante es de:

q[Btu/h·ft ²]	12000
q[kJ/s·m ²]	37,86
G(relación aire-comb)	17,17

Como hemos venido haciendo hasta ahora desarrollaremos los cálculos para la corriente de hidrógeno/metano y luego expondremos una tabla resumen para la corriente de gasoil.

2.8.2.-Estimación del calor cedido por la zona radiante

El siguiente paso es conocer el valor de la fracción de calor liberado “R” que es absorbido en la sección radiante. Este se consigue gráficamente en la **figura A8.5** y es función del flujo de calor radiante y de la relación, antes conseguida, de aire-combustible

Una vez conocida la fracción de calor liberado, podemos determinar el calor cedido por la zona radiante haciendo uso de la siguiente expresión:

$$Q_R = R \cdot Q_{\text{liberado}} \quad [\text{A2.20}]$$

Q _R [kJ/s]	1692,35
R	0,545
Q _{liberado} [kJ/s]	3105,22

2.8.3.-Estimación del área refractaria

Con este dato y el del flujo de energía radiante, se puede sacar una relación que nos dará el área refractaria, que es el área no cubierta por los tubos que está disponible en el horno.

$$A_R = \frac{Q_R}{q} \quad [\text{A2.21}]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por otro lado, se procede a la elección de las dimensiones del horno. Como los tubos se disponen a lo largo del horno y en posición horizontal, la longitud de los tubos en la zona de radiación elegida es:

$$L=60\text{ft}$$

Para conocer el número de tubos que contiene esta sección, se debe calcular el área de intercambio de un único tubo y esto es posible porque ya se conoce su diámetro externo. Dividiendo entonces el área refractaria entre el área de un único tubo se consigue determinar el número de tubos.

$$A_{1\text{tubo}} = \text{Perímetro} \cdot \text{Longitud} \quad [\text{A2.22}]$$

$$n^{\circ} \text{ tubos zona radiación} = \frac{A_r}{A_{1\text{tubo}}} \quad [\text{A2.23}]$$

Los datos obtenidos se recogen a continuación:

$A_R[\text{m}^2]$	44,71
$A_R[\text{ft}^2]$	481,21
$L[\text{ft}]$	60
$D_o[\text{ft}]$	0,198
$A_{1\text{tubo}}[\text{ft}^2]$	37,31
$n^{\circ} \text{ tubos zona rad}$	12,90

Por tanto para la corriente de hid/met la zona de radiación tendrá un número de tubos igual a:

$n^{\circ} \text{ tubos zona rad-real-}$	13
--	----

→ Corriente de gasoil

En la siguiente tabla se recogen los datos correspondientes a la corriente de gasoil:

QR[kJ/s]	10761,71
R	0,545
$Q_{\text{liberado}}[\text{kJ/s}]$	19746,25
$A_R[\text{m}^2]$	284,29
$A_R[\text{ft}^2]$	3060,04
$L[\text{ft}]$	60
$D_o[\text{ft}]$	0,896
$A_{1\text{tubo}}[\text{ft}^2]$	168,86
$n^{\circ} \text{ tubos zona rad}$	18,12
$n^{\circ} \text{ tubos zona rad-real-}$	19

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.8.4.-Método de Lobo y Evans

Todo lo que hasta ahora ha sido calculado está basado en la suposición de que el flujo de calor en la zona radiante fuese 12000 Btu/hft². Por ello se intenta, de una forma iterativa, que lo que a continuación se calcule, dé como resultado ese flujo de calor inicial.

Para ello se recurre al método de Lobo-Evans. El flujo de calor transmitido por radiación en la cámara de combustión, desde los gases calientes a temperatura T_g a los tubos a temperatura T_m se calcula en base al área de los tubos para la transferencia de calor por radiación entre dos cuerpos a distintas temperaturas. Para esto es necesario simplificar la geometría del sistema recurriendo al método de Lobo-Evans, por el cual se sustituye la superficie tubular por un área plana ficticia, A_{cp} , denominada área de plano frío, que es la superficie de un plano de igual capacidad de absorción de energía radiante. Es decir, los gases calientes se consideran como un cuerpo radiante y los tubos como un plano frío de absorción de radiación.

Este método es una base simplificada de diseño, que conviene acotar con la mayor claridad posible:

- ✓ Para hornos tipo caja o cabina, se consideran iguales las temperaturas del gas dentro de la cámara u hogar y de los humos saliendo del mismo.
- ✓ El método sólo permite determinar un valor medio de la velocidad de transferencia de calor en la zona radiante suponiendo una temperatura uniforme de la pared de los tubos.
- ✓ El movimiento de los gases alrededor de los tubos se considera en los coeficientes de transmisión de calor por convección.
- ✓ El calor cedido por unidad de volumen ha de ser inferior a 16000 Btu/h ft² para combustibles gaseosos.
- ✓ Sólo se abarcan seis casos de relación entre dimensiones de la cámara, para los que se podrá obtener un valor de la longitud del rayo radiante. (Véase las relaciones entre dimensiones en la tabla 19 del presente anexo)

Se han de solucionar varias ecuaciones simultáneamente. Por eso se sigue un proceso iterativo donde se dividirán las variables en tres grupos: explícitas, intermedias e implícitas.

→ El proceso a seguir en el cálculo es el siguiente:

1º.-establecer los valores de las variables explícitas, que son las que se determinarán de forma directa. Hay algunas variables ya conocidas y otras por conocer.

2º.-Utilizar la **figura A8.5 del anexo 8** para estimar la fracción absorbida en zona radiante, R .

3º.-Calcular el área requerida en los tubos de la zona radiante.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4º.-estimar el área del plano frío del banco de tubos, A_{cp} .

5º.-Calculado A_{cp} , hallar las dimensiones del horno y la longitud media del rayo radiante.

6º.-estimar la temperatura de los gases del horno, T_g , utilizando la ecuación propia a los combustibles gaseosos y sustituyendo el valor de R conocido en el punto 2 de este guión.

7º.-Tomar el valor de T_g para calcular la emisividad de los gases y el factor de intercambio, F, utilizando las figuras 3 y 4 del presente anexo respectivamente. Calcular el factor corregido F_s .

8º.-Utilizar la figura 5 para estimar $Q_R/\alpha A_{cp} F_s$

9º.-Calcular un nuevo valor de R.

10º.-Recalcular el valor de q y compararlo con el valor inicial.

Desarrollaremos la aplicación del método para la corriente de hidrógeno/metano, y expondremos la tabla de resultados para la otra corriente de interés, como hemos venido haciendo hasta ahora.

→Corriente hidrógeno/metano

Como se introdujo, hay variables explícitas que se conocen porque han sido ya calculadas para el caso de la corriente bajo estudio y otras que se calcularán en este apartado.

***VARIABLES EXPLÍCITAS**

- ***Variables explícitas conocidas:***

- Tipo de combustible: gaseoso (gas natural)
- Porcentaje de exceso de aire
- Relación aire-combustible
- Diámetro nominal del tubo de la zona radiante
- Temperatura del fluido a calentar a la entrada
- Calor total liberado por el combustible a la corriente de tolueno

A continuación se recogen los valores de estas variables:

ex_{aire}	0,1
$G[adim]$	17,17
$D_{nom}[in]$	10
$T_{ent}[^{\circ}F]$	68
$Q_{lib}[kJ/s]$	19746,25

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- **Variables explícitas no conocidas:**

- Temperatura de la superficie del metal
- Presión parcial de CO₂ y H₂O
- Factor de plano frío
- Flujo de energía radiante: q (Esta variable será hallada cuando tanto las variables explícitas, intermedias e implícitas lo estén).

Se calculan a continuación dichas variables no conocidas. En primer lugar se comenzará por conocer la temperatura del metal.

La temperatura de la superficie exterior de la tubería depende de la temperatura del fluido que circula por el interior del tubo, el coeficiente de película interno, la resistencia de la pared y el flujo de calor en la sección radiante. Pero un valor razonable de la temperatura de la superficie metálica se puede estimar sumando 150°F (65°C) a la máxima temperatura del fluido a calentar. La máxima temperatura es la de salida que son 608 °F.

$$T_m = T_{máx, fluido} + 150^\circ F \quad [A2.24]$$

Sustituyendo se obtiene:

T de la sup del metal[°F], T _m	758
T máx, fluido[°F]	608

La segunda de las variables a conocer es la presión parcial de los gases CO₂ y H₂O, productos de la combustión del gas natural. El valor de esta presión se determina con la siguiente ecuación:

$$P = 0,29067 - 0,0029654 ex_{aire} + 2,72 \cdot 10^{-5} ex_{aire}^2 - 1,175 \cdot 10^{-7} ex_{aire}^3 \quad [A2.25]$$

Sabiendo que el exceso de aire es de un 10%, tenemos:

ex aire	0,1
P[atm]	0,29

La tercera de las variables es el factor de plano frío, α. El método de Lobo-Evans considera los tubos como un plano frío de absorción de radiación y este factor se aplica a dicha área para corregir el espaciado entre filas de tubos. En este caso habrá dos filas de tubos en la zona de radiación, por lo que α se determinará gráficamente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

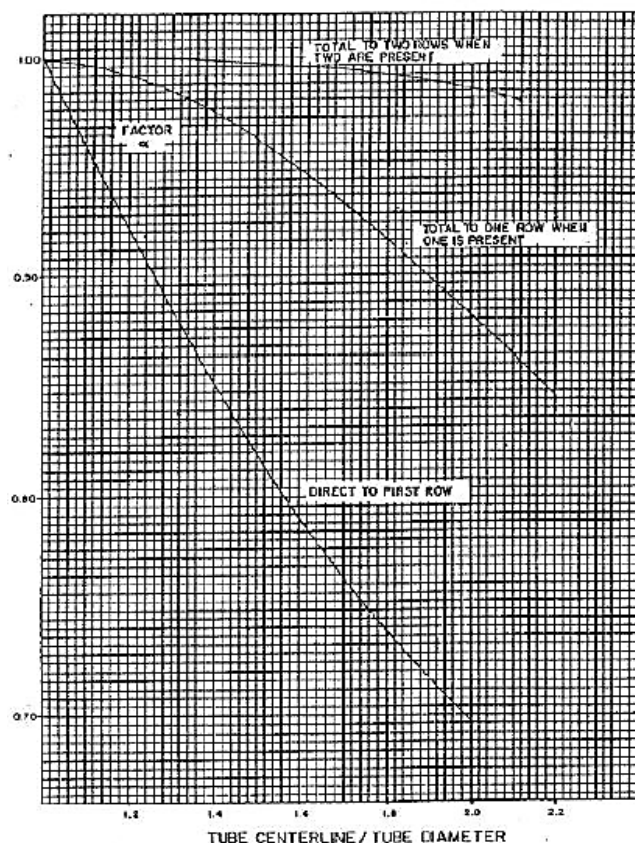


Figura 2.-Eficiencia de absorción del banco de tubos

➤ **Eficiencia de la absorción de bancos de tubos**

En la abscisa de esta figura se encuentra una relación entre la distancia de centro a centro de los tubos, denotada como C y el diámetro externo del tubo, D_o .

El parámetro C se determina a partir de la siguiente expresión:

$$C = 2 \cdot D_{nom} \quad [A2.26]$$

Recurriendo a la gráfica y sabiendo que son dos filas de tubos las que se disponen en el horno, el factor de plano frío tiene un valor de:

C[in]	3,203
D_{nom} [in]	1,601
D_o [in]	2,375
C/D_o [adim]	1,35
α [adim]	0,98

Halladas las variables explícitas, se continúa con las variables intermedias. Estas variables se fijan tras estimar la superficie requerida en la zona radiante. Son fijas en el proceso iterativo, pero se pueden cambiar para repetir cálculos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

***VARIABLES INTERMEDIAS**

- **Variables intermedias conocidas:**

— Área refractaria:

$A_R[\text{ft}^2]$ -área refractaria-	481,211
---------------------------------------	---------

- **Variables intermedias no conocidas:**

— Dimensiones de la cámara radiante: L, H, W

— Longitud media del rayo radiante: L_{rayo}

— Área del plano frío del banco de tubos: A_{cp}

Las dimensiones del horno en la zona radiante no son conocidas, pero antes si se determinó la longitud de los tubos: $L=60\text{ft}$

Para determinar la altura y la anchura del horno a diseñar, se toma en consideración una de las cuatro relaciones que se aplican a este tipo de horno (caja). Esta relación viene dada por la siguiente tabla:

Hornos rectangulares
<u>Dimensiones en orden creciente</u>
1-1-1 a 1-1-3 1-1-2 a 1-2-4
1-1-4 a 1-1- ∞
1-2-5 a 1-2- ∞
1-3-3 a 1-3- ∞

Tabla 3.-Dimensiones del horno (largo, ancho y alto)

Las relaciones pueden tomarse en cualquier orden. La relación escogida para el horno tipo caja con doble cámara es:

1-2-4

Por tanto, la altura y la anchura serán:

Dimensiones de la cámara radiante	L[ft]	60
	H[ft]	30
	W[ft]	15

Los tubos montados en la pared deben estar al menos a 4 in de la pared interior o 1,5 veces el diámetro nominal, tomándose el mayor de los dos valores.

Los valores posibles son los siguientes:

Separación pared[in]	2,4
Separación pared[in]	4

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por lo tanto nos quedaremos con el valor de 4 pulgadas pues es el mayor de los posibles valores.

Una de las dimensiones implícitas que se consideran es la longitud media del rayo radiante, este depende directamente de las dimensiones del horno y de las relaciones entre ellas como se aprecia en la siguiente tabla:

Hornos rectangulares	
<u>Dimensiones en orden creciente</u>	<u>Longitud media rayo radiante</u>
1-1-3 a 1-1-3 1-1-4 a 1-2-4	$2/3(Vol\ Horno)^{1/3}$
1-1-4 a 1-1-∞	1 x dimensión menor
1-2-5 a 1-2-∞	1,3 x dimensión menor
1-3-3 a 1-3-∞	1,8 x dimensión menor

Tabla 4.-Longitud media del rayo radiante

Por tanto, como la relación de diseño que el horno dispondrá es de 1-2-4, la ecuación del rayo radiante corresponde a:

$$L_{rayo} = \frac{2}{3}(Vol\ Horno)^{1/3} \quad [A2.27]$$

$L_{rayo}[ft]$	20
----------------	----

La última de las variables intermedias es el área del plano frío para el banco de tubos. Ésta representa el área del plano de tubos que configuran el plano frío de absorción de radiación. La ecuación que muestra este valor es la que sigue:

$$\frac{A_t}{\alpha A_{cp}} = \frac{\pi \frac{D_o}{D_{nom}}}{2\alpha} \quad [A2.28]$$

Donde:

A_t : Área exterior de los tubos (ft²)

α : Factor de plano frío

D_o : Diámetro exterior del tubo (in)

D_{nom} : Diámetro nominal (in)

Hemos de considerar que el área exterior total de los tubos es:

$$A_t = \pi D_o L (n^o\ tubos) \quad [A2.29]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Sustituyendo todos los datos y operando se obtienen los siguientes resultados:

$D_o[\text{in}]$	2,375
$D_{nom}[\text{in}]$	1,601
$L[\text{ft}]$	60
α	0,98
$A_t[\text{ft}^2]$	484,98
$A_{cp}[\text{ft}^2]$	208,16
nº de tubos	13

El valor de A_{cp} es el área que tendrían los tubos si se consideraran un plano frío que absorbiera la radiación proveniente del flujo de calor radiante.

Hasta aquí se han hallado ya todas las variables explícitas e intermedias del proceso. A continuación se determinarán las últimas de las variables, las implícitas, que son las que se obtienen de la resolución simultánea de las ecuaciones.

***VARIBALES IMPLÍCITAS**

- Variables implícitas no conocidas:
 - Temperatura de los gases del horno: T_g
 - Emisividad del gas:
 - Factor de intercambio: F
 - Nueva fracción absorbida de la zona radiante: R

La primera de las variables implícitas es la temperatura de los gases del horno, T_g , que es la temperatura de los gases de combustión a la entrada de la sección de choque. Esta zona es el inicio de la zona de convección o salida de la zona de radiación. Se puede calcular la temperatura de los gases que salen de la sección de radiación utilizando las mismas ecuaciones que se utilizan para la eficiencia total del horno quedando, para un combustible gaseoso como:

$$T_g = \left\{ \frac{0,98 - R}{9,25 \cdot 10^{-5} \left(1 + \frac{ex_{aire}}{100} \right)^{0,748}} \right\}^{1/1,128} \quad [A2.30]$$

Donde:

T_g : Temperatura de los gases de salida de la zona radiante (°F)

R : Fracción de calor liberado que es absorbido en la zona radiante

Ex_{aire} : Porcentaje de exceso de aire

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Sustituyendo los correspondientes valores y recordando que el valor de R es el calculado en el apartado 2.8.1 del presente anexo, tendremos:

$T_g [^{\circ}\text{F}]$	1691,14
--------------------------	---------

La segunda de las variables es la emisividad del gas. La emisividad de los gases calientes en el horno depende del volumen de la cámara, de la presión parcial de CO_2 y H_2O , de la longitud media del rayo radiante y de la temperatura de equilibrio del gas en la sección radiante. Esta temperatura es la temperatura después de que la llama ha dado todo su calor a los tubos, es decir, es la temperatura a la que entran los gases en los tubos de choque de la sección de convección, T_g .

La emisividad del gas se determina gráficamente a partir de la siguiente figura:

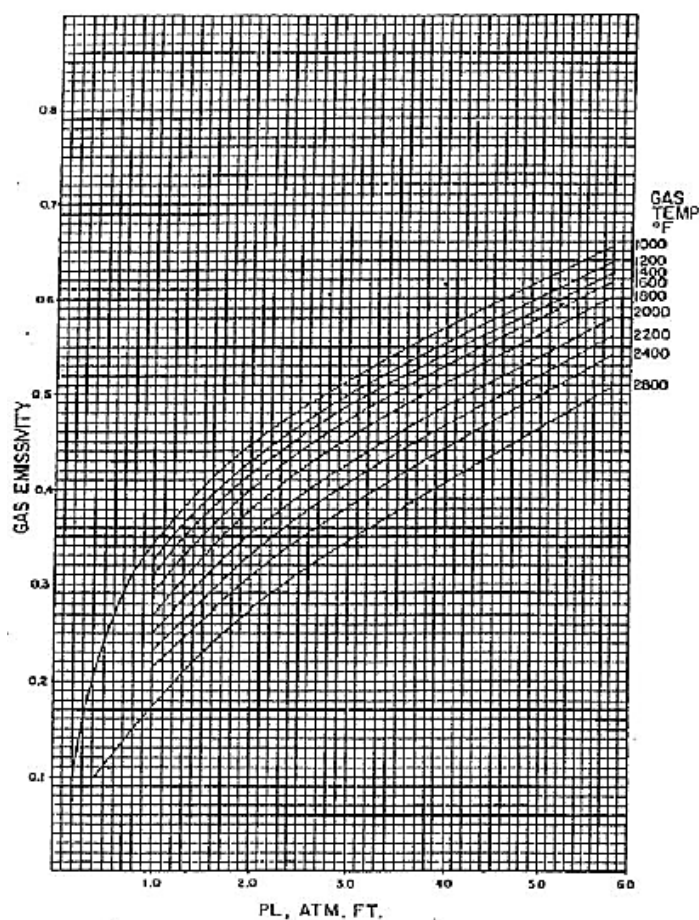


Figura 2.-Emisividad de los gases de combustión

Como se observa, en las abscisas, se busca el producto de la presión parcial y de la longitud media del rayo radiante, $P \cdot L_{\text{rayo}}$ y en ordenada se busca la emisividad a partir de las curvas de temperatura de equilibrio.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por tanto, la emisividad del gas determinada por la gráfica es:

$T_g[^\circ\text{F}]$	1691,14
$P \cdot L_{\text{rayo}}[\text{atm} \cdot \text{ft}]$	5,81
Emisividad(ϵ)	0,61

Estudiada la emisividad hay que seguir son otro de los parámetros, el factor de intercambio (F), que también es representado gráficamente y depende de la emisividad y de la siguiente relación:

$(A_r/A_{cp} \cdot \alpha)$	2,359
-----------------------------	-------

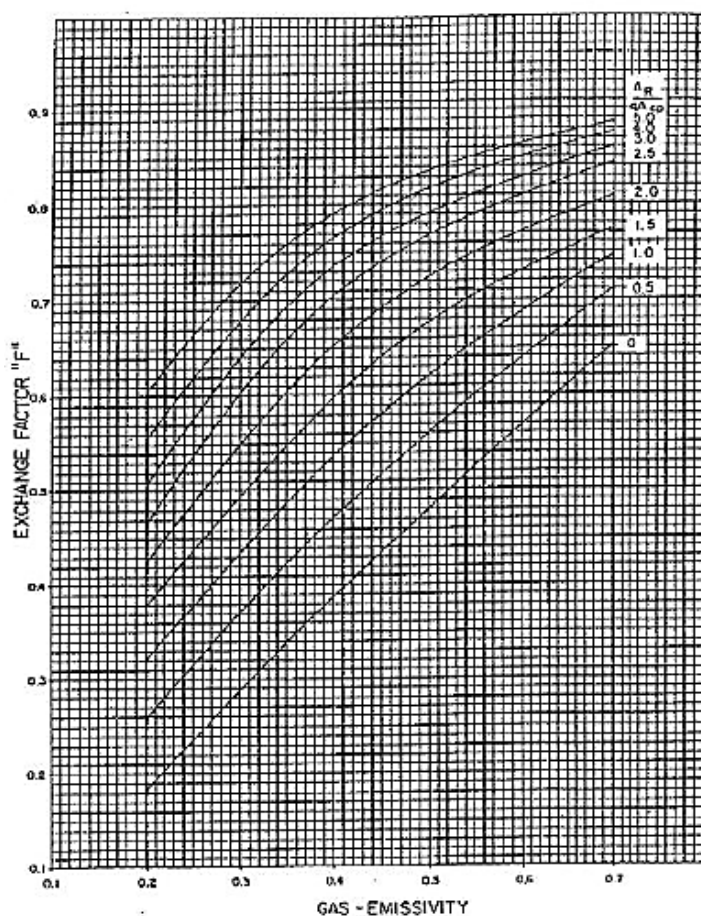


Figura 3.-Factor de intercambio F, (DEI, Universidad de Salamanca)

El factor de intercambio así calculado da fracción de calor disponible por radiación de la llama que realmente se absorbe por la superficie fría de los tubos. Pero este factor debe ser corregido para obtener el valor F_s según la ecuación:

$$F_s = \frac{F}{(1 + 0,111F)} \quad [\text{A2.31}]$$

F	0,8
F_s	0,735

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conocidas estas tres variables implícitas, se está en disposición de conocer el valor de la fracción de calor absorbida en la zona de radiación, R. Para conocerlo, es necesario estudiar previamente el calor total de absorción en la zona de radiación. Este término depende de dos temperaturas; la temperatura de equilibrio, T_g , y la temperatura de pared del tubo, T_m ; ambas halladas anteriormente:

$T_g[^\circ\text{F}]$	1691,137
$T_m[^\circ\text{F}]$	758

Según la siguiente figura, estas temperaturas darán a conocer una relación con la que posteriormente se obtendrá la fracción nombrada.

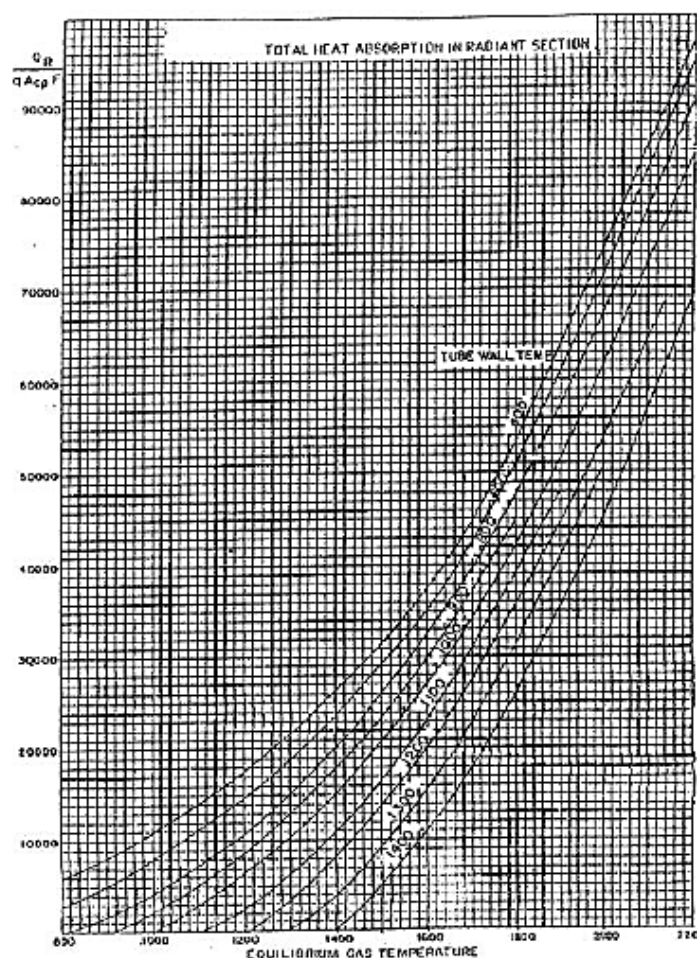


Figura 4.-Calor total de radiación en la zona de radiación

Con el resultado de la intersección de los valores de las temperaturas, la relación en el eje de ordenadas es de:

$Q_R/(\alpha A_{cp} F_s)[\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}^2]$	41000
--	-------

Dada esta relación, se puede despejar Q_R y, sustituyendo los valores del resto de parámetros, se puede calcular su valor:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$Q_R[\text{Btu/h}]$	6145471,1
$Q_R[\text{kJ/s}]$	1801,06

Una vez que se tiene el valor de Q_R se pueden calcular el último término de las variables implícitas. Este parámetro servirá para comprobar los términos inicialmente supuestos. Primeramente, él mismo, es decir, la fracción de calor absorbida, R , y por consiguiente el flujo de energía radiante, q , que es el término del que se partió.

El valor de R calculado no es el mismo que se obtuvo en el apartado 2.8.1, pues se estimó un valor del flujo de energía radiante, que si se calcula ahora, evidentemente no coincidirá con el inicialmente supuesto. Para comprobarlo, se utiliza la siguiente expresión:

$$q_{calc} = \frac{Q_R}{A_t} = \frac{Q_R}{\pi D_o L (n^\circ \text{ tubos})} \quad [\text{A2.32}]$$

En el caso de que $q_{calc} < q_{inicial}$, esto nos lleva a realizar la iteración que se comentaba el inicio del diseño de esta zona de radiación. Se procede entonces a realizar de nuevo todos los cálculos hasta que el valor de la energía radiante coincida con la inicial.

El procedimiento iterativo a seguir ahora es el que sigue:

1º.-Como el valor de $q_{inicial} > q_{calc}$ éste es necesario aumentarlo y ello se consigue aumentando el valor de la temperatura de equilibrio o lo que es lo mismo, el valor de la temperatura de salida de la zona de radiación, T_g .

2º.-De la figura 5 se determina una nueva relación $Q_R/\alpha A_{cp} F_s$, pues la temperatura del metal de los tubos se mantiene igual. Se debe tener en cuenta, que al modificar la temperatura de equilibrio, la emisividad y el factor de intercambio han de recalcularse. De dicha relación se calcula el nuevo valor de Q_R , el calor absorbido por la zona de radiación.

3º.-Como el valor del calor liberado Q_{lib} se mantiene constante, se puede hallar la fracción de calor, R , como el cociente entre Q_R y Q_{lib} .

4º.-Finalmente, utilizando estos nuevos valores, se debe calcular el nuevo flujo de energía radiante, q , utilizando la última de las ecuaciones, la ecuación A2.32 hasta que el valor de este sea cercano a $q=12000 \text{ Btu/hft}^2$.

Este procedimiento, se repetirá tantas veces como sea necesario hasta que el valor de R y q sean cercanos a los valores inicialmente supuestos.

Si en el supuesto caso de que $q_{calc} > q_{inicial}$ se debe ir corrigiendo la temperatura de equilibrio a valores menores.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tras varias iteraciones se disponen los datos en la siguiente tabla:

$T_g [^{\circ}\text{F}]$	1691,1374
$T_m [^{\circ}\text{F}]$	758
$Q_R/(\alpha A_{cp} F_s) [\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}^2]$	41000
Emisividad(ϵ)	0,61
F	0,8
F_s	0,735
$Q_R [\text{kJ}/\text{s}]$	1801,0597
$Q_{lib} [\text{kJ}/\text{s}]$	3105,2238
$D_o [\text{ft}]$	0,1979167
L[ft]	60
nº tubos	13
$A_{cp} [\text{ft}^2]$	208,16292
$Q_{calc} [\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}^2]$	12671,509

Donde el error existente entre el calor estimado y el calor calculado por iteración es menor a un 5%, por lo que consideramos como válidos estos resultados.

Hasta aquí se han calculado todas las variables para la corriente de hidrógeno/metano, pero no se debe olvidar que la corriente de gasoil, al tener un caudal diferente, tendrá resultados distintos. Para no volver a este anexo tan espeso se procede a realizar una tabla con los resultados correspondientes a la corriente de gasoil a modo de resumen.

→ Corriente de gasoil

Se recogen los resultados obtenidos para la corriente de VGO en las siguientes tablas, donde haremos distinción entre los distintos tipos de variables, como se ha venido haciendo hasta ahora:

Variables explícitas	
Tipo de combustible	gaseoso(gas natural)
ex_{aire}	0,1
G[adim]	17,167
$D_{nom} [\text{in}]$	10
C[in]	20
$T_{ent} [^{\circ}\text{F}]$	68
$Q_{lib} [\text{kJ}/\text{s}]$	19746,255
$T_m [^{\circ}\text{F}]$	758
P parcial de CO_2 y $\text{H}_2\text{O} [\text{atm}]$	0,29
$\alpha [\text{adim}]$	0,99

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Variables intermedias	
$A_R[\text{ft}^2]$ -área refractaria	3060,04
$L[\text{ft}]$	60
$H[\text{ft}]$	30
$W[\text{ft}]$	15
$L_{\text{rayo}}[\text{ft}]$	20
$A_{\text{cp}}[\text{ft}^2]$	1900

Variables implícitas	
$T_g[^\circ\text{F}]$	961,22
$Q_R/(\alpha A_{\text{cp}} F_s)[\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}^2]$	28000
ϵ	0,62
F	0,75
F_s	0,692
$Q_R[\text{kJ}/\text{s}]$	10686,914
$Q_{\text{lib}}[\text{kJ}/\text{s}]$	19746,255
R_{calc}	0,541
$Q_{\text{calc}}[\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}^2]$	11365,733

Como se aprecia, se ha conseguido que para ambas corrientes el flujo de energía radiante sea lo suficientemente próximo al supuesto inicialmente. Por lo que se dan por buenas ambas iteraciones.

2.9.-Diseño de la sección de convección

La sección de convección comprende dos zonas bien diferenciadas, la parte de los tubos de choque (desnudos), que son los tubos que separan la zona de radiación de la de convección, y los tubos con aletas.

La sección de convección tiene varias temperaturas puestas en juego. En la figura 6 se aprecian todas ellas, tanto para los gases de combustión como para los fluidos a calentar.

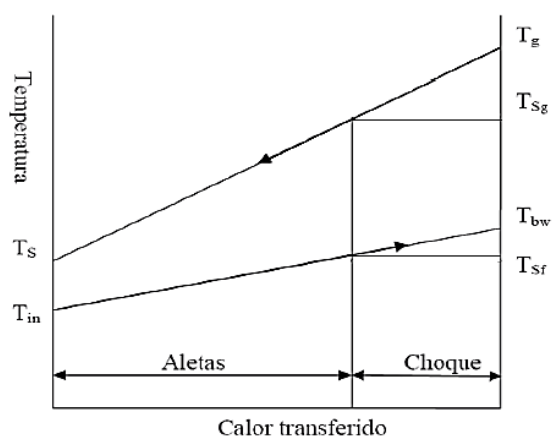


Figura 5.-Esquema de temperaturas a considerar para el diseño de la sección

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde:

T_g : Temperatura de los gases a la entrada de la sección de choque

T_{sg} : Temperatura de los gases a la salida de la sección de choque

T_s : Temperatura de los gases en la entrada de la chimenea

T_{in} : Temperatura de entrada del fluido a calentar

T_{sf} : Temperatura del fluido a la entrada de la sección de choque

T_{bw} : Temperatura del fluido a la entrada de la zona de radiación

A continuación, se procederá a calcular algunas de estas temperaturas y conocer el calor absorbido en toda la zona de convección con la misma dinámica que se hizo anteriormente, diferenciando ambas corrientes, tanto la de gasoil como la de hidrógeno/metano.

→Corriente hidrógeno/metano

Del punto anterior se conoce el valor de T_g y la fracción absorbida en la zona radiante R , ambos datos idénticos para las dos corrientes, por lo que la fracción absorbida en la zona de convección es:

$$R_c = Eff - R \text{ [A2.33]}$$

Rc	0,267
----	-------

Por otro lado, la temperatura del fluido calentado que abandona los tubos de choque y entra en la zona radiante es la temperatura puente (bridgewall), T_{bw} . Esta temperatura depende del proceso de calentamiento y es difícil de calcular manualmente. Una buena estimación con la que se puede obtener es la siguiente expresión:

$$T_{bw} = T_{in} + (T_{out} - T_{in}) \frac{R_c}{R + R_c} \text{ [A2.34]}$$

Donde:

T_{in} : Temperatura de entrada del fluido a calentar

T_{out} : Temperatura del fluido a la salida del horno

Sustituyendo las temperaturas y las fracciones de calar de cada zona del horno se obtiene un valor para la temperatura de los fluidos a la entrada de la zona radiante:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$T_{bw}[^{\circ}\text{F}]$	238,01
$T_{in}[^{\circ}\text{F}]$	68
$T_{out}[^{\circ}\text{F}]$	608
$R[\text{adim}]$	0,58

2.9.1.-Diseño de los tubos de choque

Las primeras dos o tres filas de tubos del banco convectivo, son los tubos de choque. Estos tubos, están normalmente orientados en una distribución triangular, y protegen al resto de los tubos de la radiación directa proveniente del hogar.

Son lisos debido a que están expuestos a una alta densidad de flujo de calor. La transferencia de calor en esa zona tiene lugar principalmente por convección, aunque se debe considerar también el efecto de radiación desde los gases calientes que circulan a través del banco y la que recibe desde las paredes de la zona convectiva.

Para empezar con el diseño se debe decidir en primer lugar, cuántas filas de tubos de choque se dispondrán en el horno. Para el presente diseño se eligen 2 filas.

Se desarrollarán los cálculos para la corriente de Hidrógeno/metano:

El diámetro elegido para este banco de tubos es el mismo que el tomado para los tubos de la zona radiactiva, por tanto, ya es conocido:

$D_o[\text{ft}]$	0,198
------------------	-------

De la misma manera que en la sección de radiación, los tubos se colocan horizontalmente, por lo que su longitud se mantendrá igual:

$L[\text{ft}]$	60
----------------	----

El número de tubos que esta sección comprende depende del ancho que tenga la sección de convección. El número de tubos se calcula empleando la siguiente expresión:

$$N_{tubos} = \frac{W}{C} \quad [\text{A2.35}]$$

Donde:

C: Distancia de centro a centro de cada tubo

W: Ancho zona de convección

Siendo $C=2 \cdot D_{nom}$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

W[ft]	10
C[ft]	0,267
Nº tubos	37,47
D _{nom} [ft]	0,133

Por lo tanto tomaremos un Nº de tubos de 38. Este número de tubos sería los que contiene una fila. Como se van a establecer dos, en la primera de ellas se dispondrán 19 tubos y en la segunda otros 19, colocados en disposición tresbolillo. Se reservará el resto de la sección para los tubos de choque de la otra corriente.

Además se ha tenido en cuenta que la separación de los tubos de la zona de convección con la pared es por norma de 6 in.

Se determina el área neta libre para circulación de gas alrededor de los tubos de choque desnudos a partir de la siguiente expresión:

$$N_{fas} = N_t L_{tubo} (C - D_o) \quad [A2.36]$$

Siendo:

N_{fas}: Área neta libre para la circulación del gas alrededor de los tubos de choque (ft²)

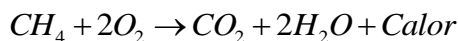
N_t: Número de tubos en una fila horizontal

L_t: Longitud de los tubos de convección (ft)

Sustituyendo los datos se obtiene el valor del área libre que los gases de combustión tienen para atravesar los tubos de choque:

N _{fas} [ft ²]	78,613
N _{fas} [m ²]	7,307

Otro de los parámetros que deben calcularse para esta sección es la velocidad másica de los gases de combustión en torno a los tubos. Los gases productos de la combustión del gas natural son el dióxido de carbono, el vapor de agua y el exceso de aire que acompaña a estos. Recordando que la reacción de combustión que tiene lugar es:



Como ya determinamos el caudal másico de combustible en el apartado 2.6.1, para calcular el caudal molar sólo debemos dividir éste entre el peso molecular del metano. Por estequiometría se pueden hallar los caudales másicos de gases de combustión. El caudal molar del CO₂ es el mismo que para el metano, y el caudal molar del H₂O es el doble que este último. Si estos se multiplican por sus correspondientes pesos moleculares y se suman, se obtiene el caudal másico total de los gases de combustión.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Si se suman todos estos caudales másicos, lo que se obtiene es la cantidad de gases total que rodearan los tubos de choque del horno y su velocidad másica vendrá dada por el resultado de dividir este caudal por el área libre de estos tubos antes calculada:

$$G_{\text{gases tubos de choque}} = \frac{W_{\text{gases comb}} + W_{\text{aire}}}{N_{\text{fas}}} \quad [\text{A2.37}]$$

Siguiendo los pasos mencionados, se obtienen los siguientes resultados:

$W_{\text{metano}}[\text{kg/s}]$	0,062
$m_{\text{metano}}[\text{kmol/s}]$	0,004
$W_{\text{CO}_2}[\text{kg/s}]$	0,171
$W_{\text{H}_2\text{O}}[\text{kg/s}]$	0,140
$W_{\text{gases comb}}[\text{kg/s}]$	0,311
$m_{\text{aire}}[\text{kmol/s}]$	0,037
$m_{\text{aire exceso}}[\text{kmol/s}]$	0,041
$W_{\text{aire}}[\text{kg/s}]$	1,173
$G_{\text{gases tubos choque}}[\text{kg/s}\cdot\text{m}^2]$	0,203
$G_{\text{gases tubos choque}}[\text{lb/s}\cdot\text{ft}^2]$	0,042

2.9.1.1.-Transmisión de calor en los tubos de choque

Conocidos estos datos físicos, se procede a calcular el calor transferido en la zona de choque. Este es producto de una iteración que se explicará más adelante.

La fracción de calor que se transfiere a la zona de tubos de choque se denota como RCc. Este valor no se conoce, por ello se supone una fracción la cual se comprobará posteriormente. Partimos de un valor de RCc=0,03.

Para calcular la transferencia de calor por convección se hace uso de las mismas expresiones que se hicieron para los intercambiadores de calor. El flujo de calor que se transfiere desde los gases de combustión hasta el fluido por el interior de los tubos es cruzado, ya que los tubos se disponen horizontalmente. Por tanto, para expresar la transferencia de calor se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_s = U_o A_o LMTD \quad [\text{A2.38}]$$

Donde:

Q_s : Velocidad de transferencia de calor (Btuh^{-1})

U_o : Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{Btuh}^{-1}\text{ft}^{-2}\text{°F}^{-1}$)

A_o : Área exterior de los tubos de choque (ft^2)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

LMTD: Diferencia de temperatura media logarítmica entre los fluidos (°F)

A continuación se irán explicando cada uno de estos términos por separado.

Empezando por el término de la temperatura media logarítmica, éste es función de las temperaturas de entrada y salida de los gases en la zona de choque y de los fluidos por el interior de los tubos de dicha zona. Se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$LMTD = \frac{(T_g - T_{bw}) - (T_{sg} - T_{sf})}{\ln \left(\frac{T_g - T_{bw}}{T_{sg} - T_{sf}} \right)} \quad [A2.39]$$

Donde ya se conocen dos de las temperaturas:

T_g : temperatura de los gases a la entrada de la zona de choque

T_{bw} : Temperatura del fluido a la salida de los tubos de choque

$T_g [°F]$	1569,91
$T_{bw} [°F]$	238,01

Y las otras dos temperaturas hay que calcularlas:

T_{sg} : Temperatura de los gases a la salida de la zona de choque

T_{sf} : Temperatura del fluido a la entrada de los tubos de choque

La primera de ellas, se conocerá con la misma ecuación por la que se conoció T_g , pero teniendo en cuenta la fracción de calor que se transfiere a los tubos de choque.

$$T_{sg} = \left\{ \frac{0,98 - R - R_{Cc}}{9,25 \cdot 10^{-5} \left(1 + \frac{ex_{aire}}{100} \right)^{0,748}} \right\}^{1/1,128} \quad [A2.40]$$

Para calcular la última de las temperaturas puestas en juego en la zona de choque, se utiliza la siguiente expresión:

$$T_{sf} = T_{in} + (T_{out} - T_{in}) \frac{R_{CA}}{Eff} \quad [A2.41]$$

Donde:

T_{in} : Temperatura de entrada del fluido a calentar

T_{out} : Temperatura del fluido a la salida del horno

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Cuyos valores ya se conocen de puntos anteriores:

$T_{in}[^{\circ}F]$	68
$T_{out}[^{\circ}F]$	608

R_{CA} : Fracción de calor absorbida en la zona de convección de tubos con aletas

Eff : eficiencia energética del horno

El término R_{CA} es de momento desconocido y para hallar esta fracción es necesario utilizar esta expresión:

$$R_{CA} = Eff - R - R_{Cc} \quad [A2.42]$$

R_{Cc}	0,06
R	0,58
R_{CA}	0,207

Conocido este valor podemos ya determinar el valor de la temperatura del fluido a la entrada de la sección de choque, sustituyendo en la ecuación A2.41, hallando así la temperatura del fluido a la entrada de la sección de choque:

$T_{sf}[^{\circ}F]$	199,73
---------------------	--------

Conocidas ya la temperatura de los gases a la salida de la zona de choque y la temperatura del fluido a la entrada de los tubos de choque podemos determinar la LMTD:

LMTD	1243,72
------	---------

Conocido este parámetro se sigue con otro de los términos de la ecuación que expresa la velocidad de la transferencia de calor en la zona de choque, el coeficiente global de transferencia de calor U_o .

El calor se transfiere desde los gases de combustión hacia la pared de los tubos de choque por convección, después a través de la pared por conducción y, por último, de la pared hacia el fluido de nuevo por convección.

Por tanto esta red de resistencias térmicas contiene dos resistencias a la convección (externa e interna a los tubos) y una a la conducción. Entonces la ecuación para el coeficiente global de transferencia de calor queda:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + d_o \frac{\ln(d_o / d_i)}{2k_m} + \frac{1}{h_{io}} \quad [A2.43]$$

En este caso los subíndices o e i se refieren a la superficie exterior e interior de los tubos, respectivamente por su significado en inglés, in y out. es la longitud de los tubos y k es la conductividad térmica del material de los tubos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Los tubos suelen deteriorarse con el paso del tiempo como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencia de calor. La capa de depósitos representa una resistencia adicional para la transferencia y provoca una disminución de la misma. El efecto neto de estas acumulaciones se representa por un factor de incrustación r_d el cual es una medida de la resistencia térmica introducida por la incrustación.

Este factor depende de la temperatura de operación, de la velocidad de los fluidos y de la duración del servicio. La incrustación se incrementa al aumentar la temperatura y disminuir la velocidad.

La relación del coeficiente global de transferencia de calor dada con anterioridad es necesaria modificarla para tomar en cuenta los efectos de la incrustación sobre la superficie interior y exterior del tubo.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + r_{do} + d_o \frac{\ln(d_o / d_i)}{2k_m} + r_{di} + \frac{1}{h_{io}} \quad [\text{A2.44}]$$

A continuación se hallará cada uno de los términos que se encuentran en esta última expresión para poder hallar el coeficiente global de transferencia.

Empezando por el primero de los términos, el coeficiente de convección exterior h_o , que representa la transferencia de calor de los gases de combustión que circulan por alrededor de los tubos hasta la pared de los mismos. Para el diseño de los hornos, este parámetro rige la siguiente ecuación, distinta a los intercambiadores de calor:

$$h_o = 1,6 \left(\frac{G^2}{D_o} \right)^{0,33} T_{av}^{0,3} + 0,0025 T_{av} - 1,65 \quad [\text{A2.45}]$$

Donde:

h_o : Coeficiente individual de convección externo ($\text{Btu h}^{-1} \text{ft}^{-2} \text{°F}^{-1}$)

G : Velocidad másica de los gases alrededor de los tubos (lb/sft^2)

D_o : Diámetro externo de los tubos de choque (ft)

T_{av} : Temperatura media del gas (°F)

La temperatura media del gas, es exactamente la media entre la entrada y la salida de estos en la zona de choque:

$$T_{av} = \frac{T_g + T_{sg}}{2} \quad [\text{A2.46}]$$

Sustituyendo los valores de las temperaturas, los cuales ya son conocidos, se obtiene el valor de la temperatura media del gas:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$T_{av}[^{\circ}\text{F}]$	1464,581
$T_{av}[^{\circ}\text{R}]$	1924,251

La ecuación A2.45 es válida para la zona de convección (tubos desnudos o con aletas). Pero para tubos de choque hay que multiplicar este valor por 1,75. ("Diseño de Equipos e Instalaciones. Universidad de Salamanca"). Obteniéndose así un nuevo valor para h_o :

$h_o[\text{Btu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}]$	6,397
$h_o[\text{Btu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}]$ -corregido-	11,195

El siguiente término correspondiente al coeficiente global de transmisión de calor U_o , es el coeficiente de transmisión por el interior de los tubos (h_i) que se determina a partir de la expresión que define el número de Nusselt, que es un número adimensional que representa la mejora de transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa:

$$h_i = \frac{kNu_d}{D_i} \quad [\text{A2.47}]$$

Donde:

k : Conductividad térmica del fluido (W/mK)

D_i : diámetro exterior (m)

Nu_d : Número de Nusselt

El número de Nusselt depende a su vez del número de Reynolds (Re) y del Prandtl (Pr), viene dado por una ecuación empírica que se representa mediante una simple relación de la ley de las potencias en la forma:

$$Nu_d = 0,023 Re^{4/5} Pr^n \quad [\text{A2.48}]$$

Aunque viene representada en la bibliografía de muchas formas diferentes, se escoge esta porque se considera flujo turbulento. Con respecto a n en este caso se toma un valor de 0,4, ya que es el fluido caliente el que circula por el exterior y la temperatura superficial de los tubos estará a mayor temperatura que el fluido frío que circula por el interior de los tubos (en caso contrario sería $n=0,3$).

La expresión que define el número de Reynolds para nuestro fluido a la temperatura media es:

$$Re = \frac{GD_i}{\mu} \quad [\text{A2.49}]$$

Donde μ es la viscosidad media del fluido en Pa·s y G es la velocidad másica real en $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ que se calculó de la zona radiante en unidades del Sistema Internacional.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Se recogen en la siguiente tabla los datos necesarios para el cálculo del coeficiente de película interno de los tubos de choque, así como los resultados obtenidos tras sustituir en las convenientes ecuaciones como se ha explicado más arriba.

$D_i[m]$	0,047
$k[W/m \cdot K]$	0,315
$\mu[Pa \cdot s]$	1,429E-05
Pr	0,664
Re	1525467,4
$G_{real}[kg/m^2 \cdot s]$	462,493
Nu_d	1727,0997
$h_i[W/Km^2]$	11546,5
$h_i[Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^\circ F^{-1}]$	2033,456
$h_{io}[Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^\circ F^{-1}]$	2603,482

Otros dos términos que incluye la ecuación del coeficiente global de transferencia de energía son los factores de incrustación. Éstos vienen tabulados en la normativa “Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association”(TEMA).En la siguiente tabla se recogen los valores de dichas resistencias:

$r_{do}[hft^2 \cdot ^\circ F/Btu]$	0,0015
$r_{dio}[hft^2 \cdot ^\circ F/Btu]$	0,005
$r_{di}[hft^2 \cdot ^\circ F/Btu]$	0,0064

Cabe mencionar que la resistencia debido a la suciedad del interior del tubo se ha calculado mediante la siguiente expresión:

$$r_{di} = r_{dio} \frac{d_o}{d_i} \quad [A2.50]$$

Calculadas estas resistencias solo queda mencionar que la conductividad térmica del acero inoxidable 316L a la temperatura de la sección de choque es :

$k_m[Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^\circ F^{-1}]$	10,231
---	--------

La resistencia a la pared metálica queda entonces:

$r_{pared}[hft^2 \cdot ^\circ F/Btu]$	0,0024
---------------------------------------	--------

Sustituyendo cada uno de los datos en la ecuación A2.44 se obtiene el coeficiente global de transferencia de calor.

$1/U_o[hft^2 \cdot ^\circ F/Btu]$	0,100
$U_o[Btu/hft^2 \cdot ^\circ F]$	10,000

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.9.1.2.-Área de transferencia de los tubos de choque

Una vez que se ha calculado el coeficiente global de intercambio de calor, el último término de la ecuación de la velocidad de transferencia A2.38 es el área exterior de los tubos de choque. Para calcularla se hará uso de la siguiente ecuación que corresponde al área de los tubos de choque de esta zona:

$$A_o = \pi D_o L N_t \text{ [A2.51]}$$

$A_o[\text{ft}^2]$	708,82
$D_o[\text{ft}]$	0,198
$L[\text{ft}]$	60
$N_{t \text{ total}}$	19

2.9.1.3.-Calor transferido a la sección de choque

Conocidos todos los valores de la ecuación A2.38 se obtiene el calor transferido en la sección de choque:

$Q_s[\text{Btu/h}]$	8815356,5
---------------------	-----------

2.9.1.4.-Comprobación de la fracción de calor absorbida por la sección de choque

Con este calor transferido se puede saber que fracción de calor absorbe la zona de choque del horno de procesos. Para ello se hace uso de la siguiente expresión:

$$R_{Cc} = \frac{Q_s}{Q_{\text{liberado}}} \text{ [A2.52]}$$

En caso de que no coincida con el valor inicialmente supuesto debemos realizar todos los pasos anteriores desde el cual se supuso R_{Cc} inicial, con la única diferencia de que en este caso el valor inicial sería el R_{Cc} calculado (proceso iterativo que se comentaba al principio de este apartado).

Tras tres iteraciones, las temperaturas y el calor transferido tienen como resultados los que se muestran en la tabla que se expone a continuación:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Zona sección de choque	
R_{Cc}	0,066
Temperaturas de la zona de choque	
$T_g[^\circ F]$	1569,91
$T_{sg}[^\circ F]$	1359,25
R_{CA}	0,207
$T_{sf}[^\circ F]$	199,73
$T_{bw}[^\circ F]$	238,01
LMTD	1243,72
$T_{av}[^\circ F]$	1464,58
Calor transferido a la zona de choque	
$Q_s[\text{Btu/h}]$	8,82E+06

→Corriente de gasoil

De manera análoga se calculan todos los datos para hallar el calor transferido a la sección de choque para los tubos de gasoil. Se exponen los resultados en la tabla que continúa:

CORRIENTE GASOIL	
$T_{bw}[^\circ F]$	262,76
$T_{in}[^\circ F]$	68
$T_{out}[^\circ F]$	608
$R_c[\text{adim}]$	0,305
$R[\text{adim}]$	0,541
$D_o[\text{ft}]$	0,896
$L[\text{ft}]$	60
$W[\text{ft}]$	10
$C[\text{ft}]$	1,667
N_{tubos}	6
$D_{\text{nom}}[\text{ft}]$	0,833
Separación con pared por norma[in]	6
$N_{\text{fas}}[\text{ft}^2]$	138,75
$N_{\text{fas}}[\text{m}^2]$	12,897
$N_{\text{t-fila-}}$	3
$W_{\text{metano}}[\text{kg/s}]$	0,395
$m_{\text{metano}}[\text{kmol/s}]$	0,0247
$W_{\text{CO}_2}[\text{kg/s}]$	1,086
$W_{\text{H}_2\text{O}}[\text{kg/s}]$	0,889
$W_{\text{gases comb}}[\text{kg/s}]$	1,975
$m_{\text{aire}}[\text{kmol/s}]$	0,235
$m_{\text{aire exceso}}[\text{kmol/s}]$	0,259
$W_{\text{aire}}[\text{kg/s}]$	6,780
$G_{\text{gases tubos choque}}[\text{kg/s}\cdot\text{m}^2]$	0,679
$G_{\text{gases tubos choque}}[\text{lb/s}\cdot\text{ft}^2]$	0,139

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Coeficientes y resistencias	
$h_o[\text{Btu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}]$	7,786
$h_o[\text{Btu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}]$ -corregido-	13,626
$h_{io}[\text{Btu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}]$	166,488
$r_{do}[\text{hft}^2^{\circ}\text{F}/\text{Btu}]$	0,0015
$r_{dio}[\text{hft}^2^{\circ}\text{F}/\text{Btu}]$	0,001
$r_{di}[\text{hft}^2^{\circ}\text{F}/\text{Btu}]$	0,00110
$k_m[\text{Btu}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}]$	10,231
$r_{pared}[\text{hft}^2^{\circ}\text{F}/\text{Btu}]$	0,004274727
$1/U_o[\text{hft}^2^{\circ}\text{F}/\text{Btu}]$	0,0837
$U_o[\text{Btu}/\text{hft}^2^{\circ}\text{F}]$	11,952
Área tubos de choque	
$A_o[\text{ft}^2]$	506,582
Calor transferido a la zona de choque	
$Q_s[\text{Btu}/\text{h}]$	7,93E+06
Fracción de calor en la zona de choque	
$Q_{\text{liberado}}[\text{Btu}/\text{h}]$	6,74E+07
R_{Cc} -calculado-	0,118

2.9.2.-Diseño de la zona de tubos con aletas

Esta sección se encuentra justo arriba de la sección de choque. El procedimiento que se pretende seguir para el diseño de la sección de convección de tubos con aletas es similar al realizado anteriormente. Este diseño, tratará de calcular el número de tubos de esta sección y una vez que se disponga de este valor, se procederá a dimensionar la altura de la sección de convección completa.

Como hemos venido haciendo hasta ahora vamos a desarrollar los cálculos para la corriente de hidrógeno/metano en primer lugar.

→Corriente hidrógeno/metano

Se considera que la sección de tubos con aletas tiene la misma longitud que la de choque:

$$L=60 \text{ ft}$$

Igualmente ha de determinarse la diferencia de temperatura media logarítmica para la sección de convección de tubos con aletas. Pero en este caso con las temperaturas puestas en juego en dicha sección:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$LMTD = \frac{(T_{sg} - T_{sf}) - (T_{stack} - T_{in})}{\ln \left(\frac{T_{sg} - T_{sf}}{T_{stack} - T_{in}} \right)} \quad [A2.53]$$

Donde ya son conocidas todas las temperaturas:

T_{stack} : Temperatura de los gases a la salida de la chimenea

T_{sg} : Temperatura de los gases a la salida de la zona de choque o a la entrada de la sección de convección

T_{sf} : Temperatura del fluido a la entrada de los tubos de choque o a la salida de la sección de convección

T_{in} : Temperatura del fluido a la entrada del horno

$T_{sg} [^{\circ}F]$	1359,254
$T_{sf} [^{\circ}F]$	199,734
$T_{stack} [^{\circ}F]$	631,67
$T_{in} [^{\circ}F]$	68
LMTD	826,09

En segundo lugar, se debe hallar el valor del área libre de paso para los gases de combustión en la sección de tubos con aletas. Este valor se puede conocer a partir de la siguiente expresión:

$$N_{faf} = N_{fas} - N_t L_{tubo} 2H f_{pi} \quad [A2.54]$$

Donde:

N_{faf} : Área libre de paso para los gases entre los tubos con aletas (ft²)

N_{fas} : Área libre de paso para los gases entre los tubos de choque (ft²)

N_t : Número de tubos en una fila horizontal

L_{tubo} : Longitud de los tubos con aletas (ft)

H : altura de las aletas (in)

t : Espesor de las aletas

f_{pi} : Número de aletas por pulgada de tubo (aletas/in)

Según las especificaciones y estándares para este tipo de hornos, las dimensiones de las aletas corresponden a las siguientes:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

H[in]	0,75
t[in]	0,105
f _{pi} [aletas/in]	3

Sustituyendo entonces todos los valores en la ecuación A2.54 teniendo siempre en cuenta las unidades con las que se trabaja se obtiene:

N _{fás} [ft ²]	78,613
N _t	19
L _{tubo} [ft]	60
N _{faf} [ft ²]	33,726
N _{faf} [m ²]	3,133

Otro término importante para el diseño de esta zona es conocer la velocidad másica de los gases en la misma. Esta velocidad se expresa mediante la siguiente expresión:

$$G = \frac{m_{total}}{N_{faf}} \quad [A2.55]$$

Obteniéndose el siguiente resultado al sustituir los valores:

G[kg/m ² ·s]	0,473
G[lb/ft ² ·s]	0,097

2.9.2.1.-Transmisión de calor a los tubos con aletas

Se seguirán las mismas pautas que para la zona de tubos de choque, por lo que en primer lugar debemos calcular la temperatura media de los gases como hicimos en el caso anterior, quedando la ecuación para este caso como sigue:

$$T_{av} = \frac{T_{sg} + T_{stack}}{2} \quad [A2.56]$$

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en la zona de convección para tubos con aletas, la ecuación que se utiliza es algo diferente, pues el término del coeficiente de película externo presenta una variante:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_{off}} + r_{do} + r_m + r_{di} + \frac{1}{h_{io}} \quad [A2.57]$$

El calor transferido en la zona con aletas no es tan eficiente como en la zona desnuda midiéndose este factor como Eff_f. El valor efectivo del coeficiente de película externo se calcula por:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$h_{o_{eff}} = h_o \frac{(Eff_f A_f + A_b)}{A_o} \quad [A2.58]$$

Donde:

H_o : Coeficiente de convección externo ($Btu h^{-1} ft^{-2} ^\circ F^{-1}$)

Eff_f : eficiencia de las aletas

A_f : Superficie de las aletas (ft^2/ft)

A_b : Superficie desnuda del tubo (ft^2/ft)

A_o : Superficie exterior del tubo (ft^2/ft)

Se procede a continuación a calcular cada uno de estos términos.

Empezando por el primero de los términos, el coeficiente de convección exterior h_o , que representa la transferencia de calor de los gases de combustión que circulan por alrededor de los tubos hasta la pared de los mismos. Para el diseño de los hornos, este parámetro rige la siguiente ecuación:

$$h_o = 1,6 \left(\frac{G^2}{D_o} \right)^{0,33} T_{av}^{0,3} + 0,0025 T_{av} - 1,65 \quad [A2.59]$$

Donde todos los parámetros son ya conocidos y teniendo en cuenta que la temperatura debe expresarse en $^{\circ}R$.

$G[lb/ft^2 \cdot s]$	0,097
$D_o[ft]$	0,198
$T_{sg}[^{\circ}F]$	1359,25
$T_{stack}[^{\circ}F]$	631,67
$T_{av}[^{\circ}F]$	995,46
$T_{av}[^{\circ}R]$	1455,13
$h_o[Btu/hft^2 ^{\circ}F]$	7,191

Prestando atención a las áreas que necesitamos en la ecuación anterior se exponen a continuación las ecuaciones necesarias para determinar cada una de ellas, así:

El área de los tubos se rige por la expresión:

$$A_o = \pi D_o \quad [A2.60]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El área desnuda del tubo es:

$$A_b = A_o(1 - f_{pi}t) \quad [A2.61]$$

Y el área de las aletas es:

$$A_f = f_{pi} \left(\frac{\pi}{2} \left[(D_o + 2H)^2 - D_o^2 \right] + \pi t (D_o + 2H) \right) \quad [A2.62]$$

Se recogen en la siguiente tabla los valores de estas áreas ya determinadas:

$A_f[\text{ft}^2/\text{ft}]$	0,105
$A_b[\text{ft}^2/\text{ft}]$	0,426
$A_o[\text{ft}^2/\text{ft}]$	0,622

El último de los términos que nos quedaría por hallar es el factor Eff_f . Se determina a partir de la **figura A8.6**. Se tiene en cuenta la altura de la aleta, el coeficiente de convección externo y el producto $k_{aleta} \cdot t$, donde k_{aleta} es la conductividad de la aleta que en nuestro caso es del mismo material que los tubos, es decir, acero inoxidable 316L.

$K_{aletas} \cdot t$	1,074
$Eff_f[\text{adim}]$	0,85
$h_{oeff}[\text{Btu}/\text{hft}^2\text{°F}]$	5,956

Una vez disponemos de todos los datos no tenemos más que sustituir en la ecuación A2.57 para conocer U_o :

$1/U_o[\text{hft}^2\text{°F}/\text{Btu}]$	0,179
$U_o[\text{Btu}/\text{hft}^2\text{°F}]$	5,600

2.9.2.2.-Calor transferido en la zona de tubos con aletas

Una vez que se conoce el valor del coeficiente global para la transmisión de calor de los tubos con aletas, se procede a calcular el calor transmitido en la zona de convección con aletas a través de la siguiente expresión:

$$Q_{ca} = Q_{lib}(Eff - R - R_{Cc}) \quad [A2.63]$$

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior se obtiene un valor para el calor transmitido en la zona de convección con aletas de:

$Q_{ca}[\text{Btu}/\text{h}]$	2,19E+06
-------------------------------	----------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.9.2.3.-Área de la zona de convección y número de tubos

Dividiendo el calor absorbido en la zona con aletas entre el coeficiente global de transmisión en la zona de las aletas y la diferencia media logarítmica, obtendremos el área de intercambio en dicha zona:

$$A_{ca} = \frac{Q_{ca}}{(LMTD)U_o} \quad [A2.64]$$

$A_{ca}[\text{ft}^2]$	473,014
-----------------------	---------

Esta área es la necesaria para la zona de convección con aletas si los tubos fueran desnudos. A partir de ella, se puede sacar el número de tubos necesarios para la zona de convección con aletas a través de la siguiente expresión:

$$N_{tf} = \frac{A_{ca}}{\pi D_o L_t} \quad [A2.65]$$

El resultado que se tiene al sustituir es el que sigue:

N_{tf}	12,679
----------	--------

Por tanto, en la zona convectiva con aletas para la corriente de hidrógeno/metano el total de número de tubos es 13.

Debido a que en una fila horizontal para la corriente de hidrógeno/metano se pueden colocar hasta tres tubos, para la zona de aletas, harán falta 5 filas de tubos.

2.9.2.4.-Altura de la sección de convección

En este apartado, solo se realizará el dimensionamiento de la altura en la zona de convección completa, es decir, tanto para tubos de choque como para tubos con aletas. El total de filas en la zona completa de convección son 13 para los tubos de choque y 5 para los tubos con aletas. Por lo tanto, la altura vertical mínima de convección será:

$$H_{conv} = 5C + 5D_o \quad [A2.66]$$

Donde ya es sabido que C es la distancia de centro a centro de tubos y D_o el diámetro exterior de los tubos. En la siguiente tabla se recoge el valor de la altura obtenido y el número de filas de tubos de cada tipo:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$H_{conv}[ft]$	8,366
$C[in]$	0,267
$D_o[in]$	0,198
filas convec	13
filas aletas	5
filas total	18

2.9.3.-Temperatura de la superficie metálica para tubos de choque y aletas

Se emplean las siguientes ecuaciones para hallar la temperatura a la que se encuentran los tubos de la zona completa de convección.

$$T_{surf} = T_{fluid} + q_c \left(\frac{1}{h_{io}} + r_{di} + r_{mo} \right) \quad [A2.67]$$

$$T_{tip} = T_{surf} + \theta(T_g - T_{surf}) \quad [A2.68]$$

Siendo:

T_{surf} : Temperatura de las superficie de los tubos de choque

T_{fluid} : Temperatura del fluido a la entrada de la zona radiante

Q_c : Flujo de calor en la zona de convección

T_g : Temperatura de los gases en la entrada de la sección de choque

T_{tip} : Temperatura de la superficie de los tubos con aletas

En primer lugar, se calcula el flujo de calor en convección y se comprueba que no sea mayor al flujo radiante máximo admisible, el cual se calcula como el 250% más del flujo radiante.

$q_{m\acute{a}x}[Btu/hft^2]$	31678,772
------------------------------	-----------

→Sección de choque

El flujo de calor en la zona de choque viene dado por la siguiente expresión:

$$q_c = U_o (T_g - T_{fluid}) \quad [A2.69]$$

Donde el coeficiente global es el correspondiente a dicha zona y la temperatura del fluido es la misma a la entrada en la zona de choque (T_{bw}).

$q_c[Btu/hft^2]$	13318,392
------------------	-----------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Ahora se está en disposición de calcular la temperatura de la superficie metálica de los tubos de choque en la ecuación A2.67.

$T_{surf}[^{\circ}F]$	360,217
-----------------------	---------

→Sección de tubos con aletas

Es necesario que se calcule un coeficiente de transferencia de calor global en esta zona, utilizándose las temperaturas T_{sg} y T_{sf} (temperatura de salida de los gases y temperatura de entrada del fluido en la sección de choque, respectivamente). Los valores para estas temperaturas son:

$T_{sg}[^{\circ}F]$	1359,254
$T_{sf}[^{\circ}F]$	199,734

A continuación se utiliza la ecuación A2.59 teniendo en cuenta que la temperatura, ahora T_{sg} , ha de tener su valor expresado en $^{\circ}R$ y se calcula el valor del coeficiente externo de convección:

$h_o[Btu/hft^2^{\circ}F]$	6,407
---------------------------	-------

Utilizando el mismo valor de la eficiencia de las aletas ($Eff_f=0,85$) y la ecuación A2.58 se obtiene un valor efectivo de coeficiente de convección externo de:

$h_{off}[Btu/hft^2^{\circ}F]$	5,306
-------------------------------	-------

Como todos los demás valores de resistencias y coeficientes son conocidos se pueden sustituir en la ecuación A2.57 y despejando adecuadamente se obtendrá un valor para el coeficiente global de transmisión de calor en la transición de los tubos choque-aleta:

$1/U_o[hft^2^{\circ}F/Btu]$	0,199
$U_o[Btu/hft^2^{\circ}F]$	5,021

Ahora, se puede conocer el flujo de energía en la zona de convección de tubos con aletas aplicando la siguiente expresión:

$$q_c = U_o (T_{sg} - T_{sf}) [A2.70]$$

Donde el coeficiente global es el anteriormente calculado y las temperaturas en juego son ya conocidas.

$q_c[Btu/hft^2]$	5822,329
------------------	----------

El último de los términos que nos queda por hallar es θ . Se determina a partir de la **figura A8.7**, se tiene en cuenta la altura de la aleta, el coeficiente de convección externo y el producto $k_{aleta} \cdot t$ donde k_{aleta} es la conductividad pero es del mismo material que los tubos, es decir, acero inoxidable 316L.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$K_{\text{aletas}} \cdot t [\text{adim}]$	1,074
$\theta [\text{adim}]$	0,21
$T_{\text{tip}} [^{\circ}\text{F}]$	529,676
$T_{\text{surf}} [^{\circ}\text{F}]$	253,159

Todo el diseño de la sección de convección del horno de procesos ha sido elaborado para la corriente de hidrógeno/metano. Por ello, como es costumbre, se desarrollará una tabla con los correspondientes datos para la corriente de gasoil.

Diseño de los tubos con aletas para la corriente de gasoil	
Temperatura de los gases a la salida a la chimenea: $T_{\text{stack}} [^{\circ}\text{F}]$	631,67
Temperatura a la entrada de la sección de convección: $T_{\text{sg}} [^{\circ}\text{F}]$	1390,389
Temperatura a la salida de la sección de convección: $T_{\text{sf}} [^{\circ}\text{F}]$	205,346
Temperatura del fluido a la entrada del horno: $T_{\text{in}} [^{\circ}\text{F}]$	68
LMTD	836,229
Altura aletas: $H [\text{in}]$	0,75
Espesor aletas: $t [\text{in}]$	0,105
Número de aletas por pulgada de tubo: $f_{\text{pi}} [\text{aletas/in}]$	3
Área libre de paso para los gases entre tubos con aletas: $N_{\text{faf}} [\text{ft}^2]$	131,663
Temperatura media de los gases en esta sección: $T_{\text{av}} [^{\circ}\text{F}]$	1011,030

Transferencia de calor de la zona de tubos con aletas	
Velocidad másica de los gases: $G [\text{lb/ft}^2 \cdot \text{s}]$	0,147
Coef. De convección exterior: $h_o [\text{Btu/hft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}]$	6,193
Área de aletas por pie de tubo: $A_f [\text{ft}^2/\text{ft}]$	0,178
Área desnuda del tubo por unidad de longitud: $A_b [\text{ft}^2/\text{ft}]$	1,928
Área exterior de los tubos por unidad de longitud: $A_o [\text{ft}^2/\text{ft}]$	2,814
$K_{\text{aletas}} \cdot t$	1,074
$\text{Eff}_f [\text{adim}]$	0,85
Valor efectivo coef. Película externo: $h_{\text{oeff}} [\text{Btu/hft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}]$	4,575
$U_o [\text{Btu/hft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}]$	4,321
Calor transmitido a la zona de tubos con aletas	
$Q_{\text{ca}} [\text{Btu/h}]$	1,45E+07

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Área y disposición de los tubos con aletas	
Área zona de convección con aletas: $A_{ca} [ft^2]$	4015,128
N_{tf}	24
filas aletas	8
Número de tubos por fila	3
Altura zona de convección: $H_{conv} [ft]$	28,188

Temperaturas de la superficie de los tubos de choque y con aletas	
Flujo de convección máximo permisible: $q_{m\acute{a}x} [Btu/hft^2]$	28414,333
Flujo de radiación zona de choque: $q [Btu/hft^2]$	11365,733
Temperatura superficie tubos de choque: $T_{surf} [^{\circ}F]$	257,154
$h_o [Btu/hft^2^{\circ}F]$	5,469
$h_{off} [Btu/hft^2^{\circ}F]$	4,040
$U_o [Btu/hft^2^{\circ}F]$	3,840
Flujo de radiación zona aletas: $q_c [Btu/hft^2]$	4551,087
$K_{aletas} \cdot t [adim]$	1,074
$\theta [adim]$	0,21
Temperatura superficie de las aletas: $T_{tip} [^{\circ}F]$	561,031
Temperatura superficie tubos aletas: $T_{surf} [^{\circ}F]$	257,154

2.10.-Diseño de la chimenea

La altura de la chimenea depende normalmente de requisitos de contaminación atmosférica por dilución de humos. También hay que tener en cuenta el tiro o draft de la chimenea cuando este es natural. Se conoce como tiro a la diferencia de presión entre la presión atmosférica y la presión en la chimenea a la misma altura (indicado en pulgadas de agua).

La presión en el interior del horno y chimenea debe ser siempre mayor al exterior, ya que la dirección de los fluidos va siempre de mayor a menor presión. En el borde de la chimenea esta presión ha de ser mayor a la ambiente para favorecer la salida de gases. Se pueden observar como ejemplo la siguiente figura:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

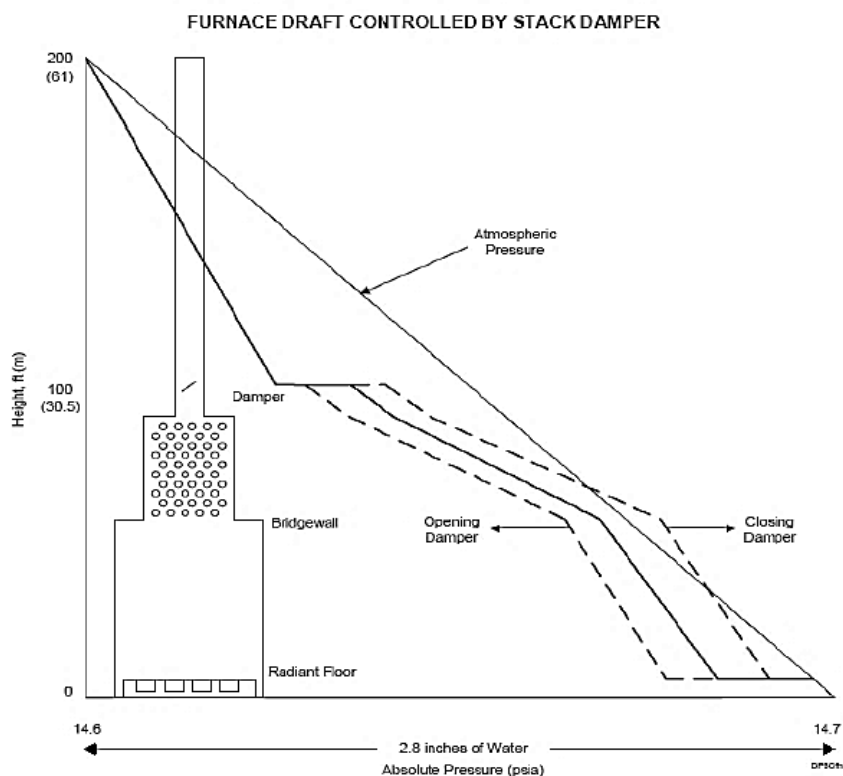


Figura 6.-Esquema ejemplo de presiones en el interior y el exterior del horno de procesos

Para comenzar con el diseño de la chimenea es necesario conocer la temperatura de salida de los gases, su velocidad másica y el diámetro que debe tener la chimenea.

Para ello se deben estimar algunos datos de partida:

Altura de la chimenea H[ft]	100
Pérdida temperatura en la chimenea[°F]	25
Temperatura del aire[°F]	68
Velocidad lineal en la chimenea[ft/s]	80

Conociendo la temperatura con la que los gases salen de la zona convectiva para salir por la chimenea (T_{stack}), se puede conocer la temperatura de salida de la misma teniendo en cuenta las pérdidas de temperatura:

$$T_{salida\ gases}^a = T_{stack} - \frac{Pérdidas\ de\ temperatura}{2} \quad [A2.71]$$

T_{stack} [°F]	631,67
$T_{salida\ gas}$ [°F]	619,17

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Es necesario conocer la densidad de los gases que salen por la chimenea y así poder hallar el flujo de velocidad por la misma y su sección. Por tanto se usa la siguiente expresión para hallar la velocidad. Nótese que para conocer el peso molecular de los gases se ha tenido en cuenta el de los gases y el del aire así como la proporción de ellos en el horno.

$$\rho = \frac{(PM)P}{RT} \quad [A2.72]$$

Siendo:

PM: peso molecular de los gases de combustión

P: Presión atmosférica

T: Temperatura de salida de los gases

R: Constante de los gases

$T_{\text{salida gas}} [^{\circ}\text{C}]$	326,206
$PM_{\text{gases}} [\text{g/mol}]$	32,3
$P_{\text{atm}} [\text{atm}]$	1
$R [\text{atmL/molK}]$	0,082
$\rho_{\text{gases}} [\text{kg/m}^3]$	0,657
$\rho_{\text{gases}} [\text{lb/ft}^3]$	0,041

Se calcula a continuación el caudal volumétrico de gases conociendo el caudal másico de gases (aire en exceso y combustible):

$$Q = \frac{W_{\text{aire}} + W_{\text{gases}}}{\rho_{\text{gases}}} \quad [A2.73]$$

En la siguiente tabal se recogen estos valores:

$W_{\text{aire sale}} [\text{lb/s}]$	15,394
$W_{\text{gases}} [\text{lb/s}]$	5,038
$Q_{\text{gases}} [\text{ft}^3/\text{s}]$	497,998

Por su parte la sección que comprende la chimenea puede conocerse a raíz del caudal y de la velocidad lineal estimada anteriormente:

$$A = \frac{Q}{v} \quad [A2.74]$$

$A [\text{ft}^2]$	6,225
-------------------	-------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El diámetro de dicha sección viene dado por la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad [A2.75]$$

Luego podemos conocer el diámetro de la chimenea y, haciendo los cálculos a la inversa, determinaremos la sección real de la chimenea y la velocidad másica de los gases:

$$G_{gases\ real} = \frac{W_{aire} + W_{gases}}{A_{stack\ real}} \quad [A2.76]$$

$D_{stack}[ft]$	4
$A_{stack\ real}[ft^2]$	12,566
$G_{gases\ real}[lb/ft^2 \cdot s]$	1,626

2.10.1.-Pérdidas de presión de la chimenea

→Pérdida de presión a la salida de la chimenea

La pérdida de presión a la salida de la chimenea viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_{ex} = 0,003 \frac{G_{real}^2}{\rho_{gas}} \quad [A2.77]$$

Donde ambos términos de la ecuación son conocidos:

$G_{real}[lb/ft^2 \cdot s]$	1,626
$\rho_{gas}[lb/ft^3]$	0,041
$\Delta P_{ex}[in\ H_2O]$	0,193

→Pérdida de presión a lo largo de la chimenea

Esta pérdida reza la siguiente ecuación:

$$\Delta P_f = 0,09 \frac{G_{real}^2}{\rho_{gas} D_{stack}} \quad [A2.78]$$

$\Delta P_f[in\ H_2O]$	1,450
------------------------	-------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

→Tiro a Draft

El tiro o draft, como se comentó antes, es la diferencia de presión entre la presión atmosférica y la presión en la chimenea a la misma altura, y se rige por la siguiente ecuación:

$$Draft = 0,018P_a \left(\frac{M_a}{T_a} - \frac{M_g}{T_g} \right) (h_2 - h_1) \quad [A2.79]$$

Donde:

P_a : Presión del aire atmosférico

M_a : Peso molecular del aire

M_g : Peso molecular de los gases

T_a : temperatura del aire

T_g : Temperatura de los gases

h_2-h_1 : Diferencia de altura en la chimenea

$P_{atm}[\text{psi}]$	14,7
$M_a[\text{kg/kmol}]$	28,84
$T_a[^\circ\text{R}]$	527,67
$M_g[\text{kg/kmol}]$	32,3
$T_g[^\circ\text{R}]$	1078,84
$h_2-h_1[\text{ft}]$	100
Draft[in H_2O]	0,654

Por lo tanto, la presión diferencial a la entrada de la chimenea viene dada por el tiro en la chimenea, menos la pérdida a lo largo de ésta menos la pérdida en la salida de la chimenea:

$$\Delta P = Draft - \Delta P_{ex} - \Delta P_f \quad [A2.80]$$

$\Delta P_{total}[\text{inH}_2\text{O}]$	-0,989
--	--------

→Pérdidas en la cámara del horno

Una vez calculada la pérdida en la chimenea y el tiro en ésta, se procede a calcular las pérdidas y tiros en otros puntos del horno. En primer lugar, la pérdida de presión del regulador está establecida en 0,05 in H_2O .

$$\Delta P_{reg} = 0,05 \text{ in } \text{H}_2\text{O} \quad [A2.81]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por otro lado, la pérdida en la recámara de entrada tiene la siguiente expresión (aunque no pueden tomarse valores inferiores a 0,05 in H₂O):

$$\Delta P_{rec\ ent} = \frac{1}{2} \Delta P_{ex} \quad [A2.82]$$

La pérdida de carga en la salida de la cámara toma un valor de 0 in de H₂O

$$\Delta P_{rec\ sal} = 0 \text{ in } H_2O \quad [A2.83]$$

Por tanto, el cambio neto de presión en la cámara es:

$$\Delta P = \Delta P_{rec\ sal} - \Delta P_{rec\ ent} - \Delta P_{reg} \quad [A2.84]$$

En esta tabla se recogen los valores de las presiones que se han indicado:

$\Delta p_{regulador}[\text{inH}_2\text{O}]$	0,05
$\Delta p_{rec\ ent}[\text{inH}_2\text{O}]$	0,097
$\Delta p_{rec\ sal}[\text{inH}_2\text{O}]$	0
$\Delta p_{total}[\text{inH}_2\text{O}]$	-0,147

→Draft a la salida de la salida de la sección de convección

Para estimar el Draft a la salida de la sección de convección, se deben sumar las dos pérdidas de presión globales:

Draft _{convección} [inH ₂ O]	-1,136
--	--------

2.11.-Temperaturas del fluido y de los gases de combustión

En este último apartado se pretende presentar a modo de resumen las temperaturas puestas en juego en el horno de procesos que se ha diseñado. Se recuerda que el fluido pasa a contracorriente de los gases y su entrada es por la sección de convección. Los gases en cambio salen de los quemadores dispuestos en el piso del horno.

Se pretende ver así el proceso de cambio de temperaturas en el horno, a medida que los fluidos circulan por su interior.

Temperaturas	°F	K
Entrada del horno o entrada sección convección, T _{in}	68	293
Salida sección con aletas o entrada sección de choque, T _{sf}	199,73	366,19
Salida sección de choque o entrada sección radiación, T _{bw}	238,01	387,45
Salida sección radiación o salida horno, T _{out}	608	593

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Temperaturas	°F	K
Salida sección de radiación o entrada sección de choque, T_g	1569,91	1127,39
Salida sección de choque o entrada sección con aletas, T_{sg}	1359,25	1010,36
Salida sección convección o entrada chimenea, $T_{sal gases}$	619,17	599,21

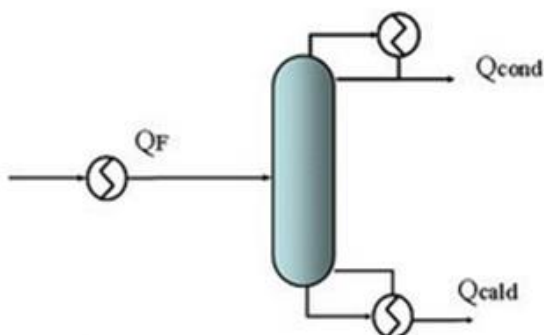
ANEXO 3.DISEÑO DE LA COLUMNA DE RECTIFICACIÓN

3.1.-Introducción

En el presente PFC, se dispone a diseñar una columna de rectificación para la separación del n-butano de la corriente principal de gasoil que se obtiene tras el proceso de hidrodesulfuración en los reactores, de este modo tendremos dos corrientes finales. Por un lado la corriente de n-butano y etilbenceno que se obtiene por cabezas de columna, en esta corriente es mayoritaria el butano y se destina a la línea de Gases Licuados del Petróleo (GLP), y por otro una mezcla de tres componentes que se dirigen a la unidad FCC dentro de la planta de refino, estando formada por etilbenceno, bifenilo y gasoil, siendo este último el mayoritario de los componentes que conforman esta corriente que se obtiene por colas de columna.

Para todo diseño de columnas de rectificación es requisito conocer las purzas con las que se desean obtener los compuestos para imponer las condiciones de diseño necesarias, así en nuestro caso son las que siguen:

Se imponen las siguientes 'duties' para condensador y reboiler:



β_c	0,9
β_r	0,9

Figura 1.-Esquema columna de rectificación

Esto se traduce en que un 90% del n-butano de la alimentación se obtiene por cabezas de la columna mientras que un 90% del etilbenceno de la alimentación se obtendrá en la corrientes de colas de la columna que vamos a diseñar. Bajo estas condiciones de diseño nos disponemos a realizar los diferentes cálculos que son necesarios para tal propósito.

Para la realización del diseño de la columna se ha hecho uso de un programa informático de simulación llamado Aspen HYSYS V8.4. Este programa es una herramienta de simulación de procesos líder en el mercado y especialmente indicado para la industria petroquímica. Éste facilita la labor de los ingenieros aportando resultados rápidos, optimizados y rigurosos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El procedimiento a seguir para trabajar con el simulador consta de dos partes. En primer lugar es necesario el cálculo previo de algunas variables que se fijan como especificaciones en el programa. En este caso es preciso calcular el balance global de materia, especificar las presiones de entrada, cabeza y fondo, y fijar el número del plato en que se sitúa cada corriente. Luego se ejecuta la simulación obteniendo todos los datos necesarios para el diseño completo de la columna.

3.2.-Diseño de la columna

3.2.1.-Alimentación de la columna

La alimentación que entra a la columna F viene caracterizada por una serie de parámetros que se recogen en la siguiente tabla:

Temperature [°C]	130
Pressure [kPa]	1426
Molar Flow [kgmole/h]	439,2
Composition	
n-Butane	0,5888
E-Benzene	0,0363
BiPhenyl	0,0493
n-C16	0,3257

3.2.2.-Balance global de materia

Para cumplir las especificaciones que se requieren en el diseño de esta columna debemos resolver en primer lugar un balance de materia global del sistema. De este modo las ecuaciones utilizadas en el desarrollo de este balance son las siguientes:

$$F = D + W$$

$$F \cdot x_F = D \cdot x_D + W \cdot x_W \quad [A3.1]$$

Siendo:

F: caudal de alimentación de la torre [kg/h]

D: caudal de destilado que abandona la torre por cabeza [kg/h]

W: caudal que se extrae del fondo de la columna [kg/h]

X_i: composición másica de cada componente en cada corriente

En la siguiente tabla se recogen los valores de caudales y composiciones de cada una de las corrientes de interés:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Componentes	i	x_F	F	D	W	x_D	x_W
n-butano	1(LK)	0,5888	71,9587	64,7628	7,1959	0,9932	0,1262
etilbenceno	2(HK)	0,0363	4,4314	0,4431	3,9882	0,0068	0,0700
bifenilo	3	0,0493	6,0218	0	6,0218	0	0,1056
n-hexadecano	4	0,3257	39,7990	0	39,7990	0	0,6982
Sumatorios		1	122,2108	65,2059	57,0048	1	1

3.2.3.-Condición de alimentación

Dependiendo de la forma en que entre la alimentación a la columna, el número de platos o equilibrios necesarios para llevar a cabo la separación deseada se modifica, y, lo que es más importante, se modifican también los caudales molares en el interior de la columna. Por ello definimos la condición de alimentación ϕ .

Los valores que puede tomar este parámetro son los siguientes:

- Líquido saturado: $\phi=1$
- Vapor saturado: $\phi=0$
- Mezcla líquido-vapor: $\phi=(0,1)$
- Líquido subenfriado: $\phi>1$
- Vapor subenfriado: $\phi<1$

Como la alimentación entra en la columna a su temperatura de ebullición, podemos decir que la condición de alimentación, ϕ , tendrá un valor de $\phi=1$.

3.2.4.-Determinación de las etapas mínimas, relación de reflujo y del número de etapas de equilibrio

El método FUG es el más utilizado en el caso de columnas de destilación multicomponente. Se trata de un método aproximado basado en una secuencia de cálculo propuesta por Fenske, Underwood y Gilliland, de ahí su nombre, para la obtención del número de platos teóricos mínimos, la relación de reflujo mínima y número de platos teóricos, respectivamente.

El método FUG permite, a partir de la consideración de separación de los componentes clave, decidir el tipo de condensador más adecuado para la separación propuesta, la relación de reflujo más adecuada y el número de platos en la zona de agotamiento y rectificación a partir de correlaciones empíricas.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.4.1.-Determinación de las k para las corrientes con Hysys

El primer paso para poder aplicar el método FUG en el diseño de torres de rectificación es la determinación de las volatilidades de los componentes implicados en dicha separación. Para ello podemos emplear la ecuación de Antoine u otros métodos termodinámicos.

En nuestro caso particular hemos hecho uso del simulador AspenTech HYSYS, los pasos a seguir para llevar a cabo el procedimiento se explica en el apartado 2.6.1. Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

Componentes	K_F	K_D	K_W
n-butano	1,6889	1,0006	3,1907
etilbenceno	0,1244	0,0714	1,8733
bifenilo	0,0100	0,0000	1,1180
n-hexadecano	0,0017	0,0000	0,8463

3.2.4.2.-Determinación de las α para las corrientes respecto al clave pesado

Una vez determinadas las correspondientes volatilidades pasamos a determinar otros parámetros de interés para la aplicación del método, como son las volatilidades relativas. Estas se definen como la relación entre volatilidades, en nuestro caso particular estarán referidas al componente clave pesado, de este modo los resultados obtenidos son los que siguen:

$$\alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j} \quad [\text{A3.2}]$$

Donde en nuestro caso el componente j es el componente clave pesado.

Componentes	α_F	α_D	α_W
n-butano	13,5797	14,0106	1,7033
etilbenceno	1,0000	1,0000	1,0000
bifenilo	0,0803	0,0000	0,5968
n-hexadecano	0,0134	0,0000	0,4518

3.2.4.3.-Número mínimo de etapas: ecuación de Fenske

La ecuación de Fenske para la determinación del número mínimo de etapas viene dado por la siguiente expresión:

$$N_{\min} = \frac{\log \left[\left(\frac{x_{D,LK}}{x_{D,HK}} \right) \left(\frac{x_{W,HK}}{x_{W,LK}} \right) \right]}{\log \alpha_m} \quad [\text{A3.3}]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde α_m es la media geométrica entre las volatilidades relativas de cabeza y cola:

$$\alpha_m = \sqrt{(\alpha_{LK,HK})_D (\alpha_{LK,HK})_W} \quad [A3.4]$$

La ecuación de Fenske no está restringida únicamente a los componentes clave. Es posible utilizarla para dos componentes cualesquiera de la columna multicomponente. Una vez conocido el número de platos mínimo de la columna es posible conocer la composición de cada componente en cabeza y cola de columna conocida la de un componente de referencia r y la composición de la alimentación.

$$x_{Wi}W = \frac{x_{Fi}F}{1 + \left(\frac{x_{Dr}D}{x_{Wr}W}\right) \alpha_m^{N_{\min}}} \quad [A3.5] \quad x_{Di}D = \frac{x_{Fi}F \left(\frac{x_{Dr}D}{x_{Wr}W}\right) \alpha_m^{N_{\min}}}{1 + \left(\frac{x_{Dr}D}{x_{Wr}W}\right) \alpha_m^{N_{\min}}} \quad [A3.6]$$

Que permiten obtener la distribución de los componentes no calve a reflujo total, que debería de coincidir con los valores supuestos en el principio del algoritmo de cálculo del método. Si se observa alguna diferencia, es necesario rehacer los cálculos de presión en la columna para seleccionar el condensador más adecuado.

En la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos:

cociente x_D	146,1468
Cociente x_W	0,5542
α_m	4,8851
NPT_{\min}	2,7704

Por lo tanto tenemos que el número de platos mínimo es 3.

3.2.4.4.-Relación de reflujo mínimo: ecuación de Underwood

El reflujo mínimo se define como la relación mínima entre el vapor que sale de la cabeza de columna y el líquido condensado que retorna a esta. Es decir, el reflujo cuando se retira la mayor cantidad posible de destilado.

Para estimar el reflujo mínimo hay que considerar las zonas invariantes o de contacto en la que el número de platos se hace infinito y no varía la composición de plato a plato. Para el caso de los sistemas multicomponentes pueden ocurrir varias situaciones: que tengan un punto de contacto (clase1) o que tengan dos puntos de contacto (clase2).

Para los de clase 1, todos los componentes de la alimentación se distribuyen entre las corrientes de cabeza y cola. En este caso el punto de alimentación estará localizado en la zona de la alimentación.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Para los de clase 2, uno o más de los componentes solamente aparecen en uno de los productos.

La expresión empleada para el cálculo de la relación de reflujo mínima externa es la que sigue:

$$\frac{L_{\infty}}{D} = \frac{\frac{x_{Dj}}{x_{oj}} \alpha_{\infty ij} - \frac{x_{Di}}{x_{oi}}}{1 - \alpha_{\infty ij}} \quad [A3.7]$$

El principal problema de esta expresión es el de conocer x_{oi} y x_{oj} . Para resolver esta dificultad se presentan dos posibilidades en función del sistema multicomponente que estemos tratando: Clase 1 o Clase.

✓ Si el sistema es de clase 1, la zona de contacto aparece en el plato de alimentación tal y como ocurre en el caso binario. Por tanto se puede considerar que $x_{oi} = x_{Fi}$ y que $x_{oj} = x_{Fj}$.

✓ Si el sistema es de clase 2, Underwood desarrolla un método aproximado pero suficientemente exacto para determinar la relación de reflujo mínima. Se considera que la volatilidad relativa para cada componente es la misma en las zonas invariantes superior e inferior y se supone que el flujo molar es constante. Las ecuaciones para las zonas invariantes se expresan en función de la volatilidad relativa definida con respecto a un compuesto de referencia, generalmente el clave pesado. El procedimiento algebraico parte de definir un coeficiente ε y ε' del siguiente modo:

Para la zona de rectificación:

$$\sum \frac{(\alpha_{i,ref})_{\infty} x_{Di}}{(\alpha_{i,ref})_{\infty} - \varepsilon} = 1 + (R_{\infty})_{\min} \quad [A3.8]$$

Para la zona de agotamiento:

$$\sum \frac{(\alpha'_{i,ref})_{\infty} x_{Wi}}{(\alpha'_{i,ref})_{\infty} - \varepsilon'} = 1 - (R'_{\infty})_{\min} \quad [A3.9]$$

Donde $(R_{\infty})_{\min}$ y $(R'_{\infty})_{\min}$ son las relaciones de reflujo externa mínimas para las zonas de enriquecimiento y agotamiento.

Underwood demostró que debe haber una solución común para ε y ε' denominada θ de forma que $\theta = \varepsilon = \varepsilon'$. Sustituyendo en ambas expresiones, multiplicando una por D y la otra por W, sumándolas y operando se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum \frac{(\alpha_{i,ref})_{\infty} x_{Fi}}{(\alpha_{i,ref})_{\infty} - \theta} = 1 - \phi \quad [A3.10]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde ϕ es la condición de alimentación. Para el caso en que únicamente se distribuyen los dos componentes claves, la ecuación se resuelve iterativamente para obtener una raíz que cumpla la condición de $\alpha_{LK,HK} > \theta > 1$. Se obtiene entonces la relación de reflujo mínima utilizando la siguiente expresión:

$$\sum \frac{(\alpha_{i,ref})_{\infty} x_{Di}}{(\alpha_{i,ref})_{\infty} - \theta} = 1 + (R_{\infty})_{\min} \quad [A3.11]$$

Si se sospecha que hay distribución de algún componente no clave, no se puede utilizar directamente en la expresión anterior los valores estimados de x_{Di} . Esto ocurre especialmente cuando los componentes no clave tienen volatilidades intermedias entre los dos componentes clave. En este caso hay que resolver la ecuación:

$$\sum \frac{(\alpha_{i,ref})_{\infty} x_{Fi}}{(\alpha_{i,ref})_{\infty} - \theta} = 1 - \phi \quad [A3.12]$$

Hasta obtener m raíces, siendo m el número de componentes distribuidos menos uno. Además cada raíz de θ estará comprendida entre una pareja adyacente de volatilidades relativas de componentes distribuidos. Con las raíces obtenidas se plantea un sistema de ecuaciones para obtener la relación de reflujo mínima y el valor desconocido de la composición de destilado de los distribuidos cumpliéndose la condición de que el sumatoria de las composiciones del destilado es igual a la unidad.

→ Resultados de cálculo

Debido a la gran cantidad de términos que incluye esta ecuación se ha recurrido al uso de la hoja de cálculo Excel. Además, se ha aplicado la función “Solver” para obtener de forma sencilla el factor iterativo:

θ	C_4H_{10}	C_8H_{10}	$C_{12}H_{10}$	$C_{16}H_{34}$	Σ	R_{\min}
1,057529	0,638534	-0,63029	-0,00405	-0,00417	1,85E-05	0,011

→ Relación de reflujo real

El parámetro calculado en la sección anterior es llamado Relación de reflujo mínima externa. A partir de la siguiente relación mostrada se determinan la relación de reflujo mínima interna:

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{\min} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{R_{\min}}\right)} \quad [A3.13]$$

Normalmente para estimar el valor real se considera, a partir de criterios económicos, el reflujo óptimo. Para columnas intermedias con un número medio de etapas se considera

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

que la óptima se obtiene como 1,30 veces la relación mínima, aunque dependiendo del número de etapas este valor puede variar entre 1,10 y 1,50.

En el caso bajo estudio el valor de la relación de reflujo mínimo es bastante baja por lo que tomaremos la relación de 1,5, por lo que:

$$\left(\frac{L}{V}\right) = 1,5 \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} \quad [\text{A3.14}]$$

Por último, a raíz de $\left(\frac{L}{V}\right)$, podemos obtener el valor de la Relación de reflujo externa real (R) con la expresión que relaciona ambos valores:

$$R = \frac{\left(\frac{L}{V}\right)}{1 - \left(\frac{L}{V}\right)} \quad [\text{A3.15}]$$

En la tabla que se muestra a continuación se recogen los datos de cálculo para la determinación de la relación de reflujo real:

R_{\min}	0,011
$(L/V)_{\min}$	0,0109
(L/V)	0,0167
R_D	0,017

3.2.4.5.-Número de etapas de equilibrio

Para el cálculo de las etapas de equilibrio se emplea la correlación empírica de Gilliland. Estos estudios son válidos para:

- Destilaciones entre 2 y 11 componentes
- Condición de alimentación entre 0,28 y 1,42
- Presión de vacío de hasta 600 psig
- Volatilidades relativas entre 1,1 y 4,05.
- Relaciones de reflujo interna mínima entre 0,53 y 9,09.
- Número mínimo de platos entre 3,4 y 60,3.

Si se verifica que para esta columna se cumplen todos los requisitos y se puede continuar con este método, entonces emplearemos la siguiente gráfica para determinar el número mínimos de platos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

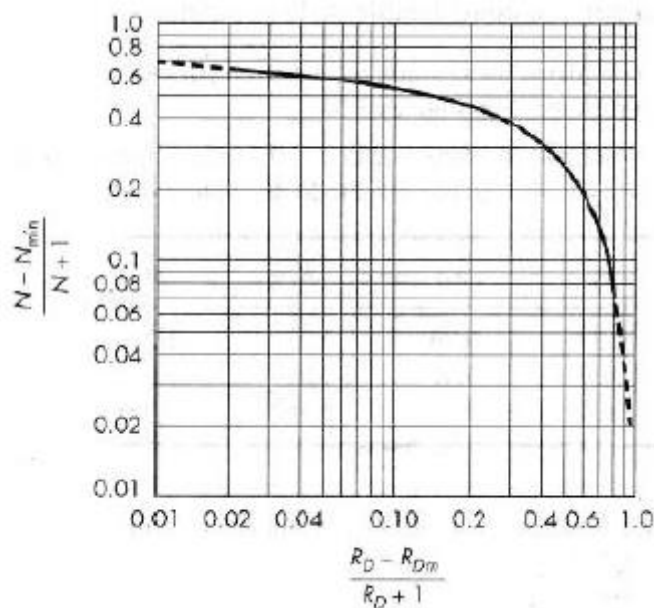


Figura 2.-Gráfica de Gilliland

Otra opción viable es emplear la relación numérica de Molokanov para determinar en número de etapas de equilibrio, esta expresión tiene la siguiente forma:

$$\frac{N - N_{\min}}{N + 1} = 1 - \exp \left[\left(\frac{1 + 54,4x}{11 + 117,2x} \right) \left(\frac{x - 1}{\sqrt{x}} \right) \right] \quad [A3.16]$$

Donde:

$$x = \frac{R_D - R_{\min}}{R_D + 1} \quad [A3.17]$$

Sustituyendo en esta expresión se tienen los siguientes valores:

x	0,0059
Cociente N	0,7683
N	15,2725

Obtenemos así un número de etapas de equilibrio igual a 16, así se concluye que el número de platos de la columna es 15, ya que hay que restarle una etapa que es el equilibrio del calderín.

3.2.4.6.-Localización del plato de alimentación

Si se quiere obtener de manera aproximada el plato óptimo en el que debe ser introducida la alimentación se recurre a la siguiente ecuación empírica propuesta por Kirkbride donde se estima la relación existente entre el número de platos teóricos existentes en la zona de rectificación y el existente en la de agotamiento.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Ecuación empírica de Kirkbride :

$$\frac{N_R}{N_A} = \left[\left(\frac{x_F}{x_D} \right)_{HK} \left(\frac{x_W^2}{x_F} \right)_{LK} \left(\frac{W}{D} \right) \right]^{0,206} \quad [A3.18]$$

Los datos obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

cociente1	785,1064
cociente2	0,0271
cociente3	0,8742
Nr/Na	0,5975
Nr	6
Na	9

Cuando el plato de alimentación es uno de los platos centrales, es decir, hay cierta simetría en la columna, es posible considerar que la relación de platos de rectificación/agotamiento es igual que la relación de platos mínimos obtenida por Fenske.

Ecuación de Fenske :

$$\frac{N_R}{N_A} = \frac{\log \left[\left(\frac{x_D}{x_F} \right)_{LK} \left(\frac{x_F}{x_D} \right)_{HK} \right]}{\log \left[\left(\frac{x_F}{x_W} \right)_{LK} \left(\frac{x_W}{x_F} \right)_{HK} \right]} \frac{\log \sqrt{\alpha_F \alpha_W}}{\log \sqrt{\alpha_D \alpha_F}} \quad [A3.19]$$

Los datos correspondientes se tienen en la siguiente tabla:

Bloque num	9
bloqueden	9
Raiz num	4,8094
raiz den	13,7934
numerador	0,6509
denominador	1,0875
Nr/Na	0,5985
Nr	6
Na	9

Como podemos ver no hay diferencia entre ambos métodos para el caso bajo estudio.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.5.-Número de etapas reales

3.2.5.1.-Eficacia de plato

En una torre de destilación real no se llega a alcanzar el equilibrio entre el líquido y el vapor en cada plato. La composición del vapor que sale del plato es menor que la del equilibrio y la del líquido mayor. Por esta razón, Drickamer y Bradford proporcionaron una sencilla relación empírica de la eficacia global (E_g) de la columna con la viscosidad media de la alimentación:

$$E_g = 0,17 - 0,616 \log \sum x_{i,F} \cdot \frac{\mu_{i,F}}{\mu_w} \quad [A3.20]$$

Donde:

$x_{i,F}$: es la fracción molar de cada componente en la alimentación

$\mu_{i,F}$: es la viscosidad dinámica del líquido a la temperatura promedio de la columna (cP)

μ_w : es la viscosidad dinámica del agua a 20°C (cP)

La viscosidad se determina con la ecuación de Andrade y a partir de los respectivos coeficientes para cada compuesto:

$$\log \mu_L = a + \frac{b}{T} \quad [A3.21]$$

En nuestro caso hemos tomado los valores de viscosidad que nos da el simulador AspenTech HYSYS, con el que hemos trabajado para realizar el diseño de la torre. Podemos conocer el número de etapas reales teniendo en cuenta la expresión:

$$NPR = \frac{NPT}{E_g} \quad [A3.22]$$

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos, así como las etapas reales de la torre y los platos correspondientes a cada sección:

Componentes	x _F	μ _F [cP]	μ _W [cP]	Bloque[adim]
n-butano	0,5888	0,0650	1,0020	0,0382
etilbenceno	0,0363	0,2191	1,0020	0,0079
bifenilo	0,0493	0,6553	1,0020	0,0322
n-hexadecano	0,3257	0,6628	1,0020	0,2154
			sumatorio	0,29379

E _g	0,4977
NPR	30,1392

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Nuestra torre estará formada entonces por 30 platos reales .En resumen, la columna consta de 30 platos de los cuales 12 se encuentran en la zona de rectificación y los 18 restantes en la zona de agotamiento, entrando la alimentación en el plato número 12.

3.2.6.-Ejecución del simulador Hysys y datos finales

Como se comentó en la introducción de este anexo, el procedimiento seguido para el diseño de esta columna a través del simulador AspenTech HYSYS consta de dos partes. En los apartados anteriores se ha realizado el cálculo previo de variables que deben especificarse en el simulador con el fin de obtener el funcionamiento óptimo de la columna. Luego se comprobarán los resultados obtenidos y se anotarán los resultados definitivos.

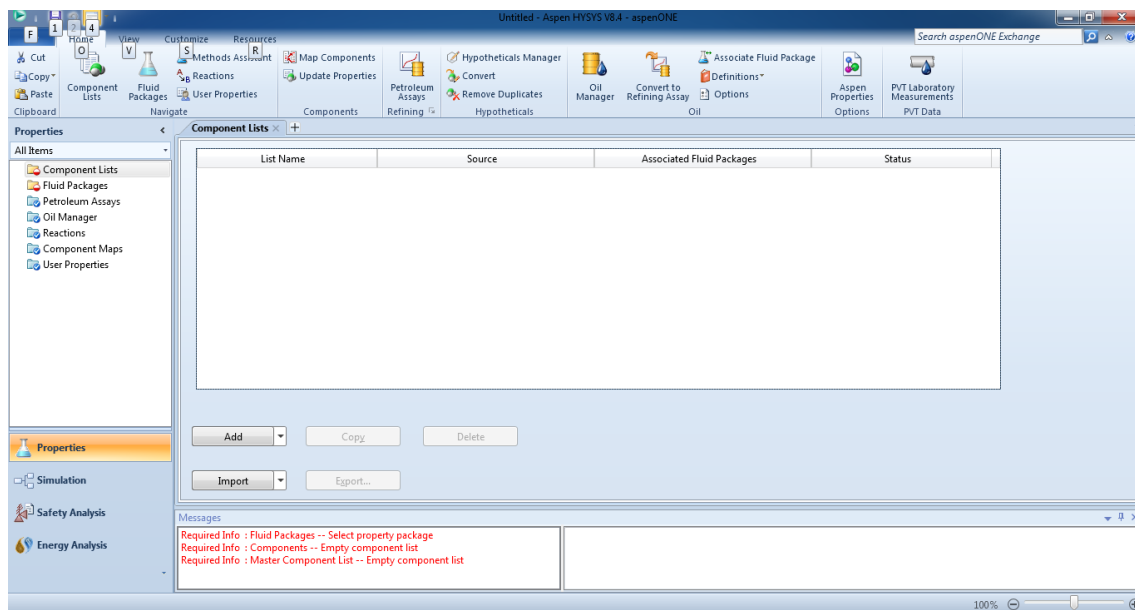
A continuación se explica paso a paso e ilustradamente el uso del simulador. Durante el trabajo con el simulador se llevarán a cabo dos simulaciones bien diferenciadas, teniendo cada una de estas simulaciones un fin diferente.

3.2.6.1.-Simulación de una Short Cut Distillation (apoyo de cálculo)

La primera de las simulaciones es un modelo aproximado que nos sirve de apoyo para realizar los cálculos previos a la simulación y el diseño de la torre real. De modo que con esta primera simulación obtendremos valores de interés como los parámetros K de cada uno de los componentes y los valores de relación de reflujo empleados.

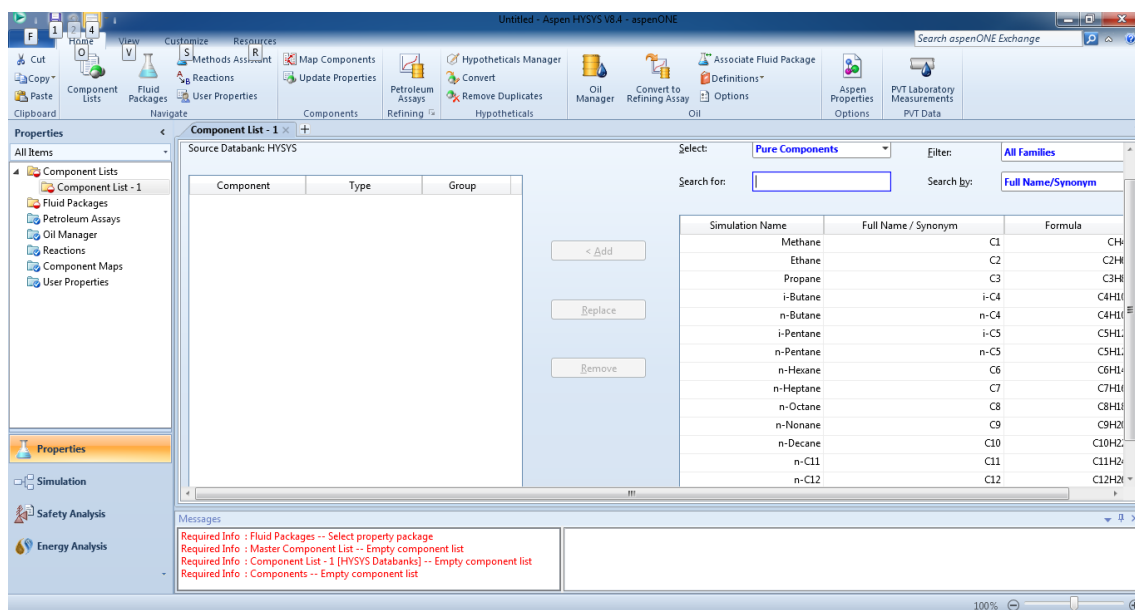
- A continuación se detallan los pasos a seguir para esta primera simulación:

Lo primero que nos encontramos al abrir el programa es la siguiente pantalla:

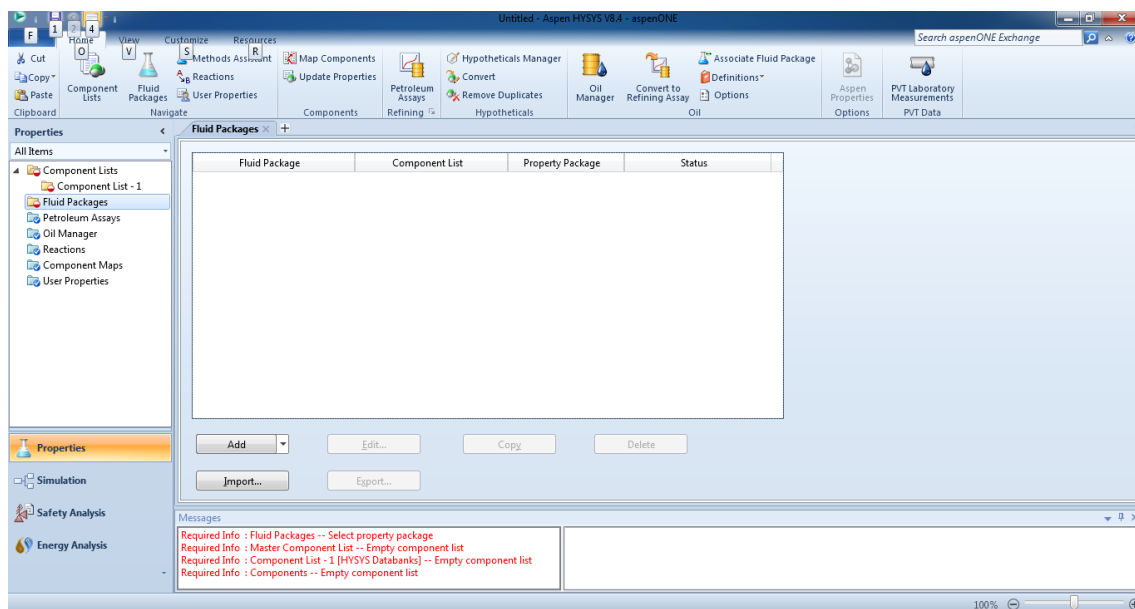


Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por tanto el primer paso para poder ejecutar nuestra simulación es añadir la lista de componentes que se encuentran involucrados en el sistema. Para ello en la carpeta de *Components Lists* vamos a *Add* y seleccionamos los componentes correspondientes.

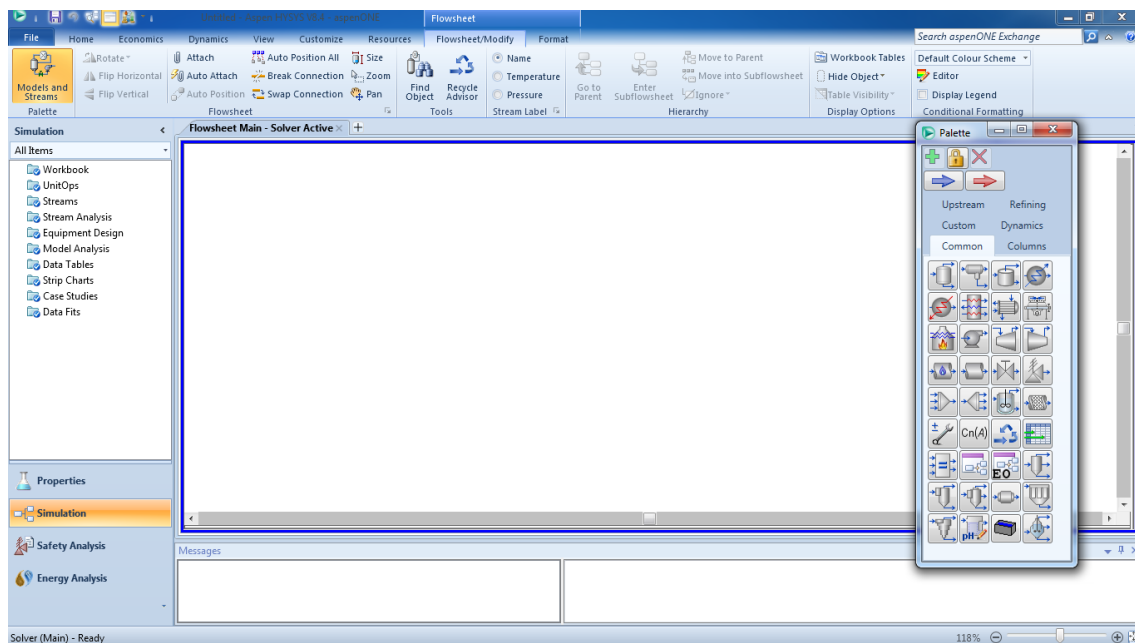


Una vez hecho esto debemos establecer el paquete de ecuaciones que deseamos que use el programa para estimar propiedades termodinámicas. Para ello vamos a *Fluid Packages* y seleccionamos el modelo que mejor se ajuste a nuestro caso particular. Para el diseño de nuestra torre hemos seleccionado las ecuaciones de estado de *Peng-Robinson*.



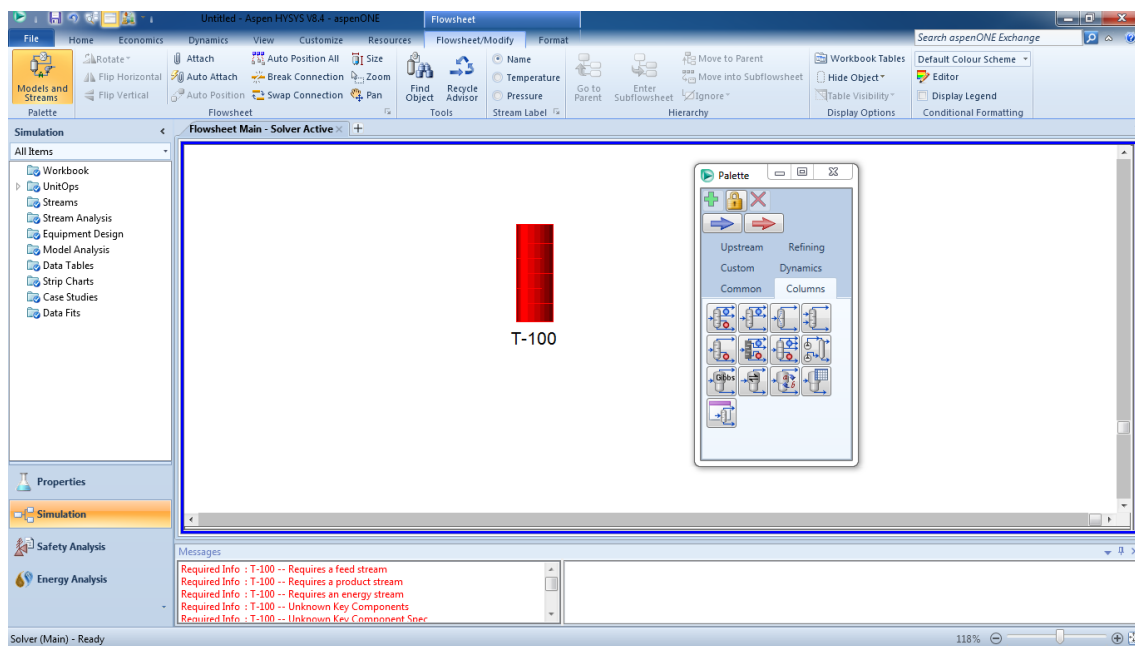
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Ya tenemos especificadas las propiedades necesarias para continuar con el diseño de la torre por lo que picamos en *Simulation* y nos aparece la siguiente interfaz:



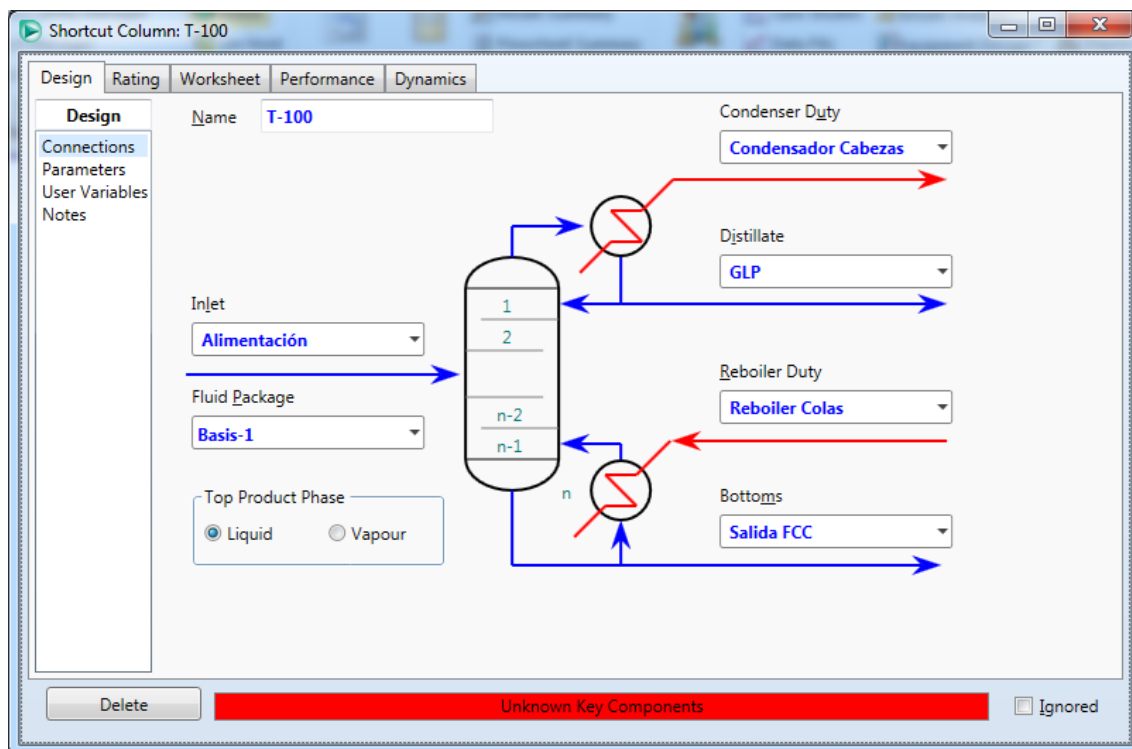
Observamos una nueva hoja en blanco donde se irán colocando los equipos y una paleta de operaciones en la que podemos seleccionar los equipos que se desean añadir.

Para los cálculos iniciales y construcción del Excel para el cálculo de parámetros previos se selecciona la opción *Short Cut Distillation* y se arrastra hacia el panel.

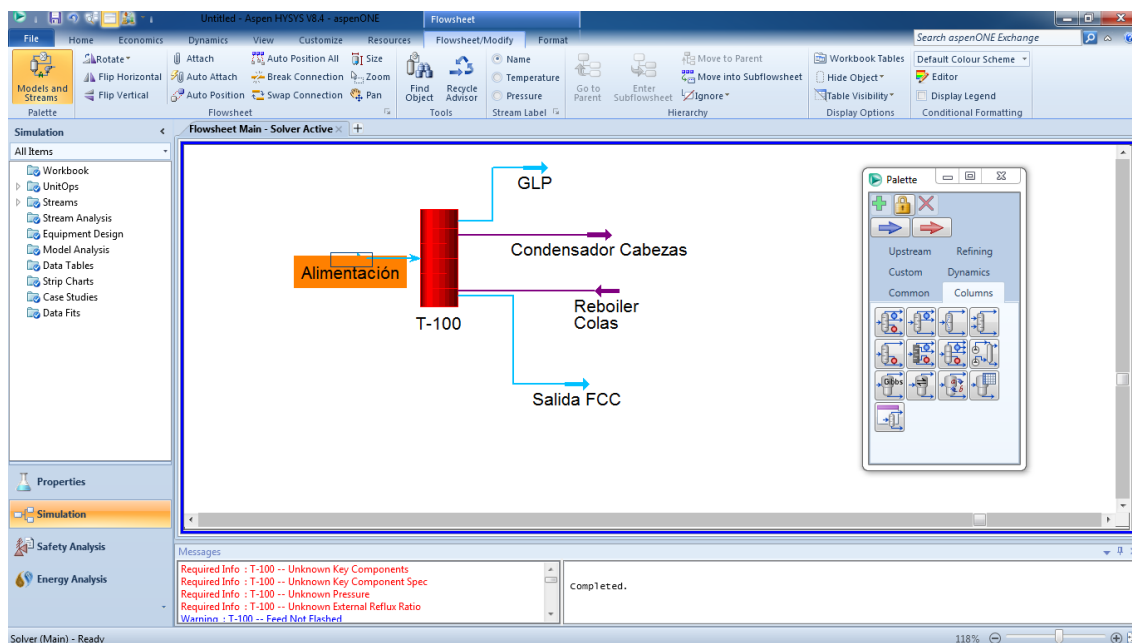


Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Hacemos doble click en el icono de la *columna T-100* y seguidamente aparece una ventana donde se introduce el nombre de las corrientes.

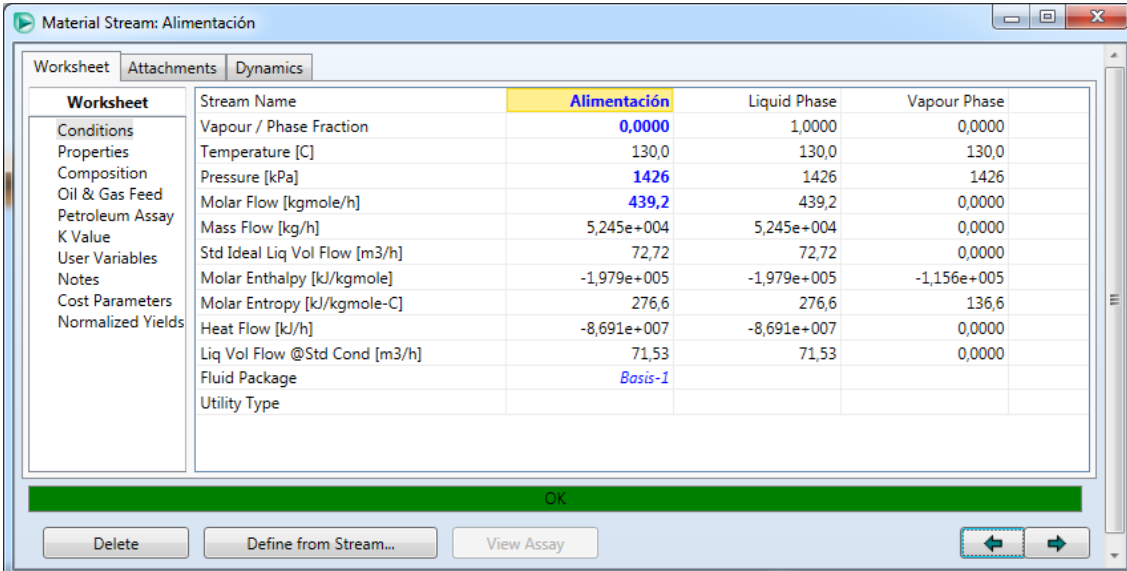


Una vez nombradas cada una de las corrientes cerramos esta ventana y volvemos al panel general, donde picaremos en la corriente de alimentación para establecer las condiciones a las que llega a la columna.

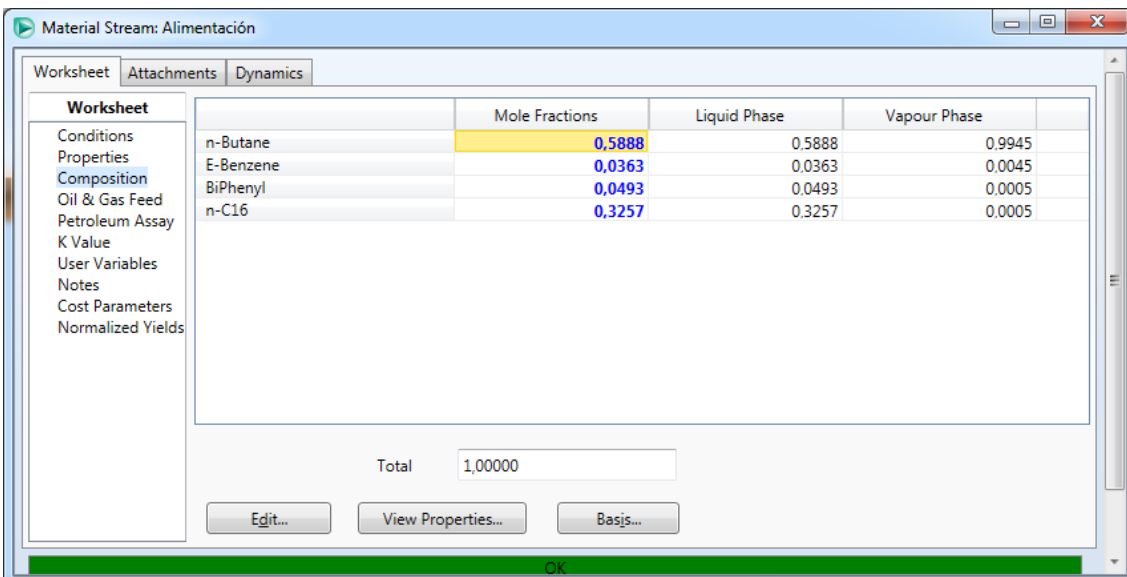


Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tras hacer doble click en la corriente de alimentación se nos abre una ventana de la que nos interesan las pestañas *Conditions* y *Composition*, rellenando los valores correspondientes obtendremos los valores de K necesarios para los cálculos previos en la pestaña *K Value*. A continuación se muestran las pantallas mencionadas con los valores correspondientes ya introducidos o, en su caso, calculados por el programa.



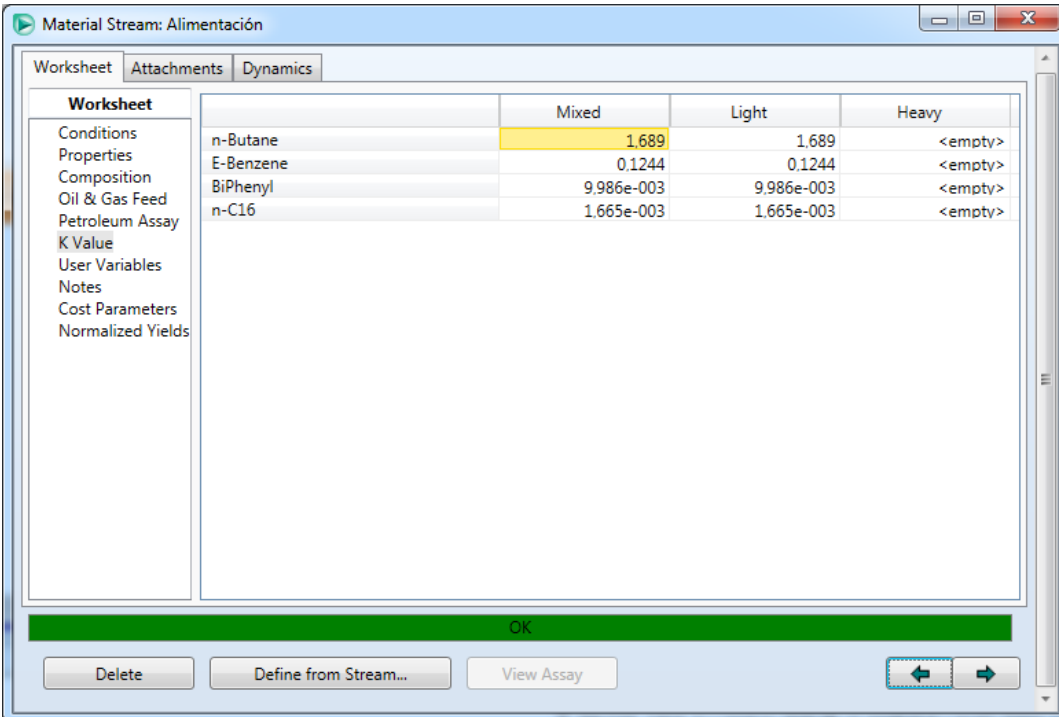
Worksheet	Stream Name	Alimentación	Liquid Phase	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000	0,0000
Properties	Temperature [C]	130,0	130,0	130,0
Composition	Pressure [kPa]	1426	1426	1426
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	439,2	439,2	0,0000
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	5,245e+004	5,245e+004	0,0000
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	72,72	72,72	0,0000
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1,979e+005	-1,979e+005	-1,156e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	276,6	276,6	136,6
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-8,691e+007	-8,691e+007	0,0000
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	71,53	71,53	0,0000
	Fluid Package	Basis-1		
	Utility Type			



Worksheet	Mole Fractions	Liquid Phase	Vapour Phase
Conditions	n-Butane	0,5888	0,9945
Properties	E-Benzene	0,0363	0,0045
Composition	BiPhenyl	0,0493	0,0005
Oil & Gas Feed	n-C16	0,3257	0,0005

Total 1,00000

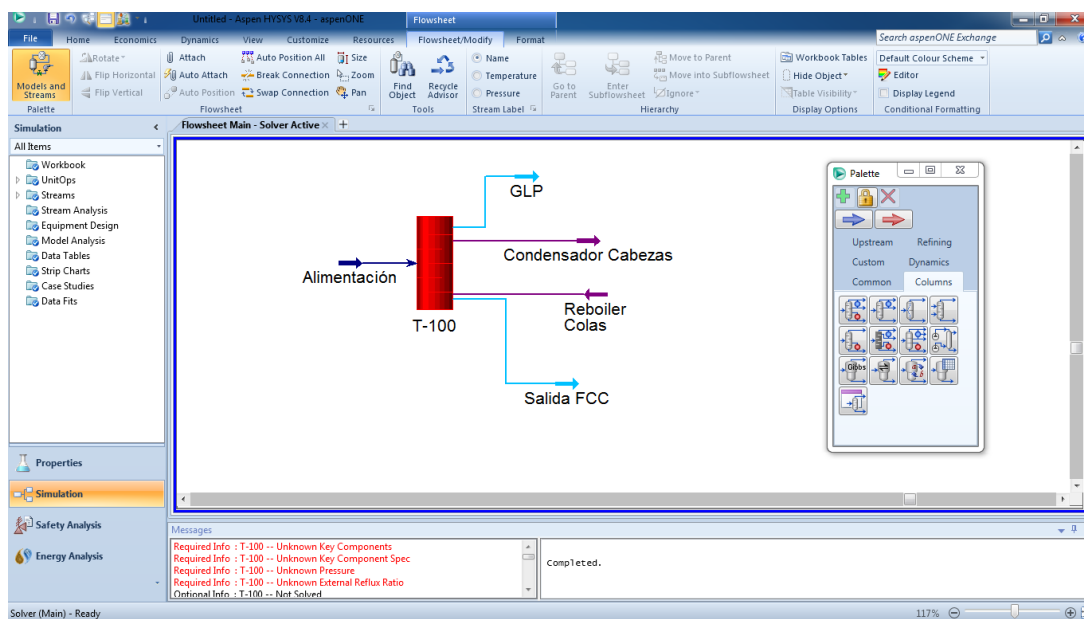
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.



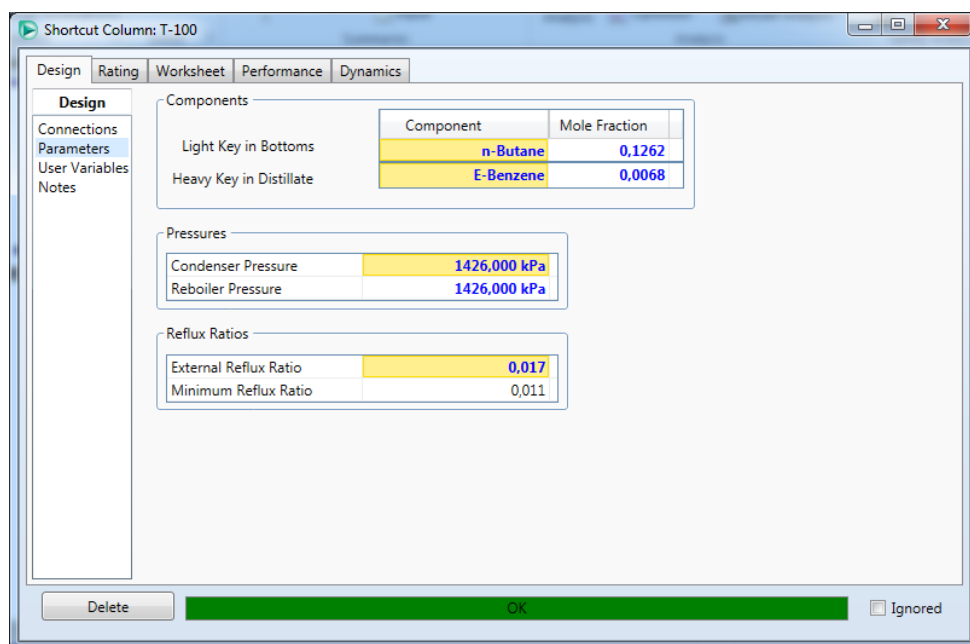
	Mixed	Light	Heavy
n-Butane	1.689	1.689	<empty>
E-Benzene	0.1244	0.1244	<empty>
BiPhenyl	9.986e-003	9.986e-003	<empty>
n-C16	1.665e-003	1.665e-003	<empty>

Puede observarse que en la parte inferior de estas ventanas aparece una franja verde con un OK en el centro. Esto nos indica que las condiciones impuestas son adecuadas para la alimentación dada.

Para terminar de ajustar esta torre debemos salir de la corriente de alimentación y entrar de nuevo en la interfaz de la torre, dentro de la cual nos vamos a dirigir a *Design-Parameters*. En esta ventana debemos introducir los componentes clave y las condiciones de presión del condensador y el reboiler.

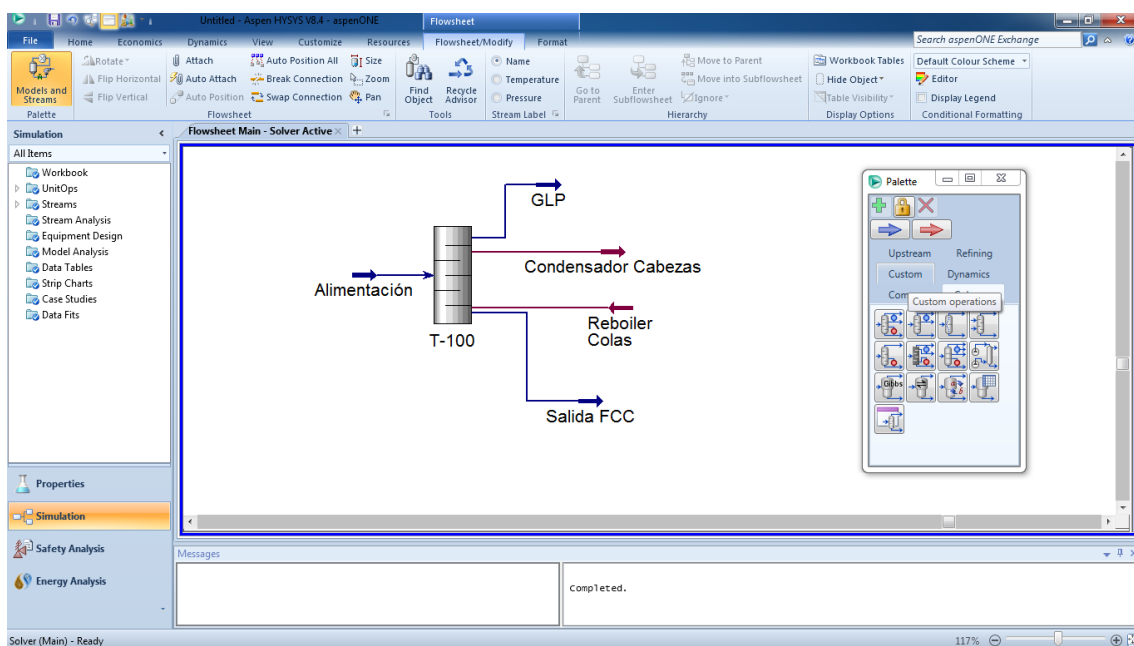


Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.



Es además en esta ventana donde vamos a probar diferentes relaciones entre la relación de reflujo mínimo y reflujo externo para buscar la convergencia en el proceso iterativo (obtener franja verde en el programa) y terminar de ejecutar esta primera simulación que nos será de gran ayuda a la hora de elaborar la simulación de la torre que verdaderamente deseamos diseñar.

El aspecto de esta primera simulación una vez terminada es la siguiente:



Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Las corrientes tienen un tono azul que nos indica que están bien definidas y la torre ha pasado de estar en rojo a gris. Esto nos indica que el simulador funciona correctamente y por tanto los resultados obtenidos serán válidos para la siguiente etapa en la simulación y el diseño de la torre.

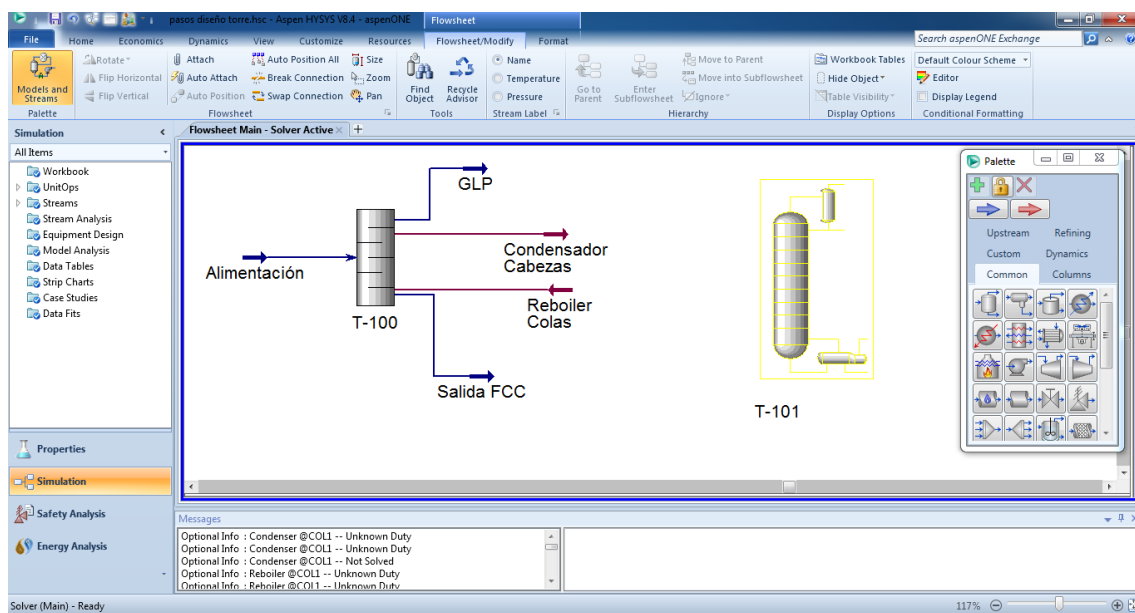
3.2.6.2.-Simulación de la torre de platos (Distillation Column Sub-Flowsheet)

Partimos de la simulación anterior para ejecutar esta nueva simulación, por lo que no es necesario repetir los pasos que se siguen en la pestaña *Properties* del programa, ya que tanto los componentes como la ecuación de estado empleada serán los mismos.

Gracias a la simulación previa de una *Short Cut Distillation* pudimos elaborar un modelo previo con el que aplicar el método FUG, serán estos resultados los que se van a comparar con la simulación que vamos a realizar en este apartado.

Pues bien, a continuación se explican con detalle los pasos necesarios a seguir para realizar la simulación en AspenTech HYSYS.

En primer lugar se selecciona el icono de la torre de destilación en la paleta de operaciones y se arrastra hacia el panel.



Como hacíamos en el caso anterior para poder hacer modificaciones en la unidad hacemos doble click y se nos abre una ventana donde se introducen el número de platos, los nombres de las corrientes y el número de plato donde entran o salen las mismas. Recordemos que nuestro número de platos es 30, siendo el plato de alimentación el número 12.

Distillation Column Input Expert

Condenser Energy Stream: **Condensador**

Column Name: **T-101**

Condenser: ☒ Total, ☐ Partial, ☐ Full Rflx

Oyhd Liquid Outlet: **Butano(GLP)**

☐ Water Draw

Optional Side Draws

Stream	Type	Draw Stage
<< Stream >>		

Reboiler Energy Stream: **Reboiler**

Bottoms Liquid Outlet: **Producto(salida FCC)**

Inlet Streams

Stream	Inlet Stage
Alimentación colu	5_Main TS
<< Stream >>	


Stage Numbering: ☒ Top Down, ☐ Bottom Up


< Prev Next >

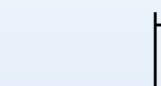
Connections (page 1 of 5) Cancel

Distillation Column Input Expert

Reboiler Configuration

 ☒ Once-through

 ☐ Circulation without baffle

 ☐ Circulation with baffle

Reboiler Type Selection

☒ Regular Hysys reboiler ☐ Heater ☐ Heat exchanger

Hot Side

☐ Tube ☒ Shell

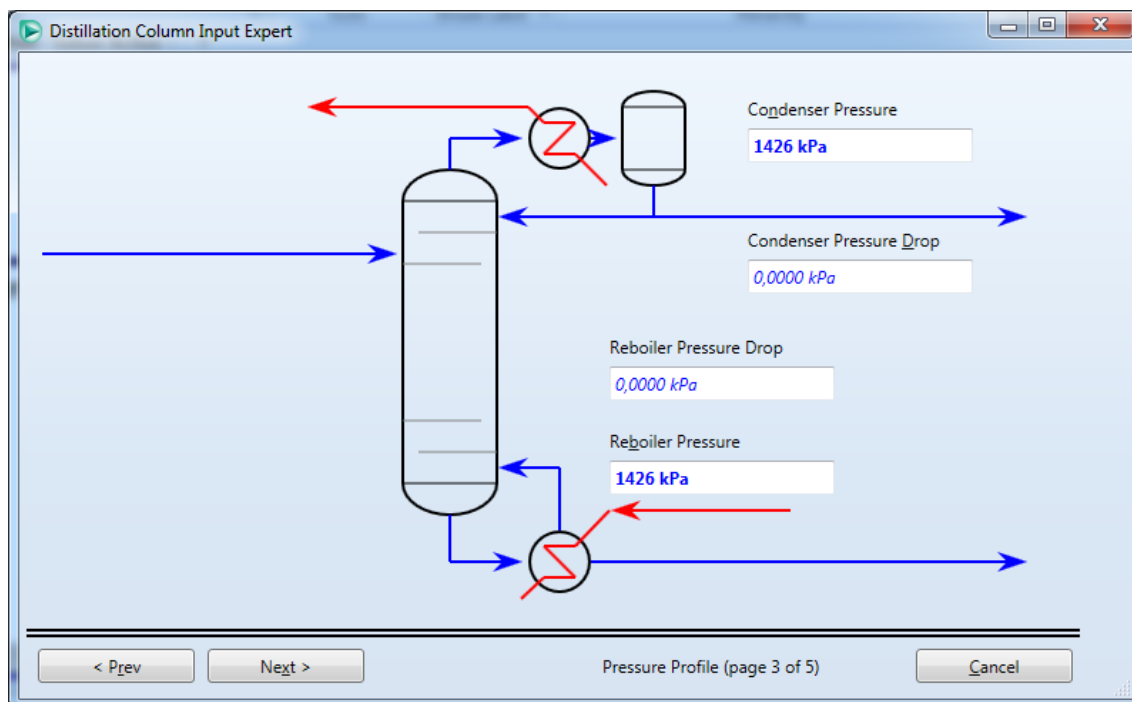
< Prev Next >

Reboiler Configuration (page 2 of 5)

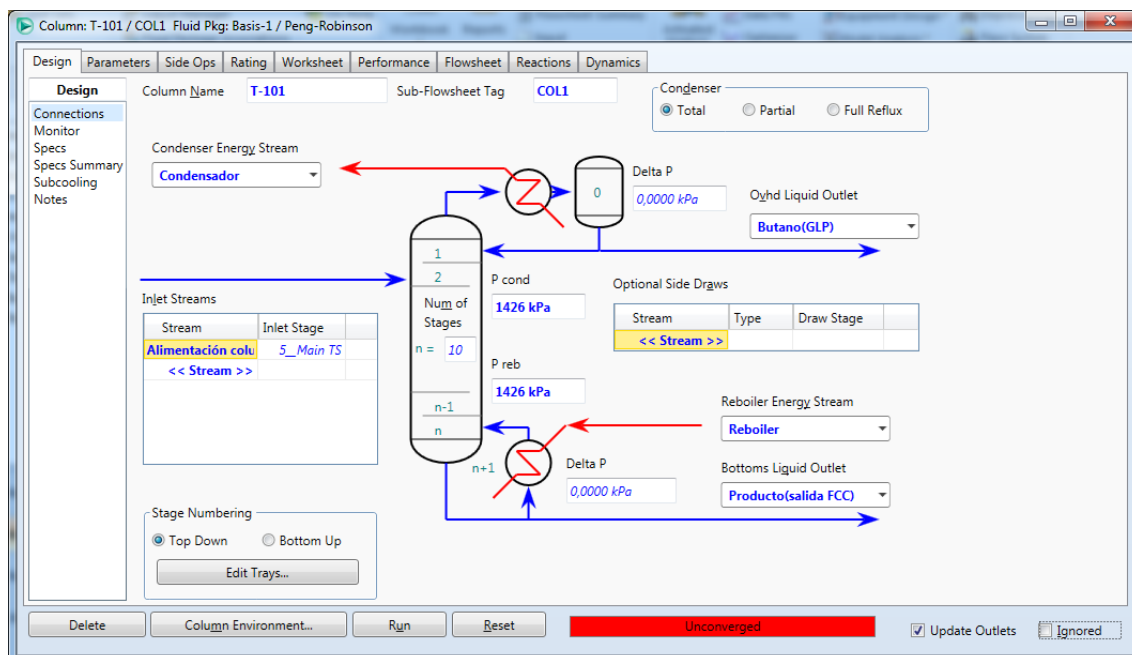
Cancel

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Volvemos a pulsar *Next* y se nos abre una nueva ventana que debe completarse con el valor de la presión que se quiere tener en el condensador y en el reboiler:

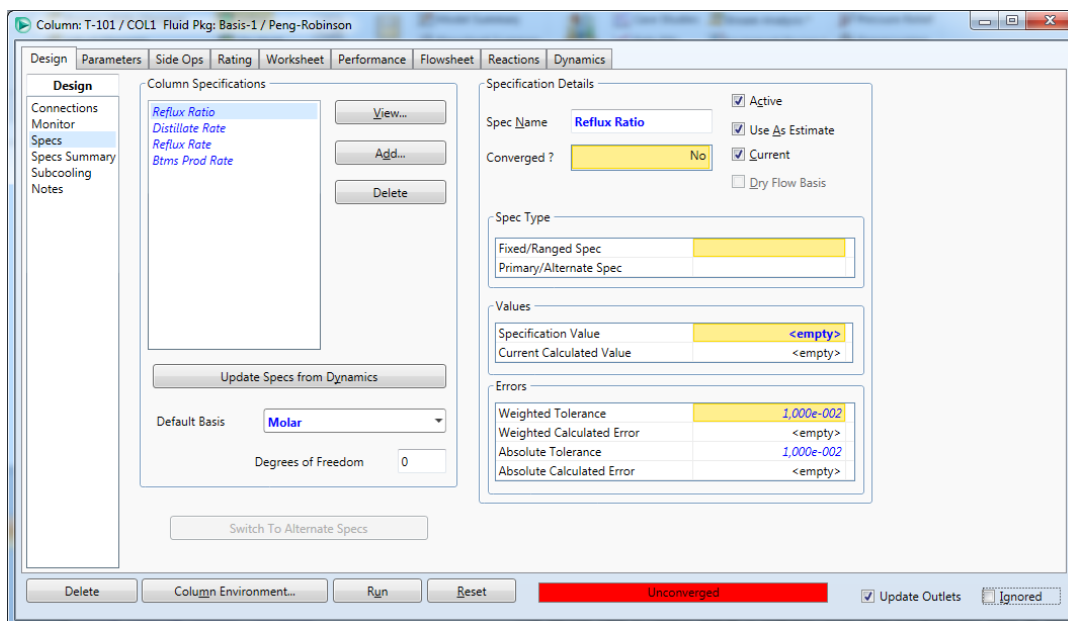


Los siguientes pasos son opcionales, por lo tanto se presiona *Next* hasta que aparezca la opción *Done*. Una vez creada la columna aparece una tabla con el resumen de todos los datos.



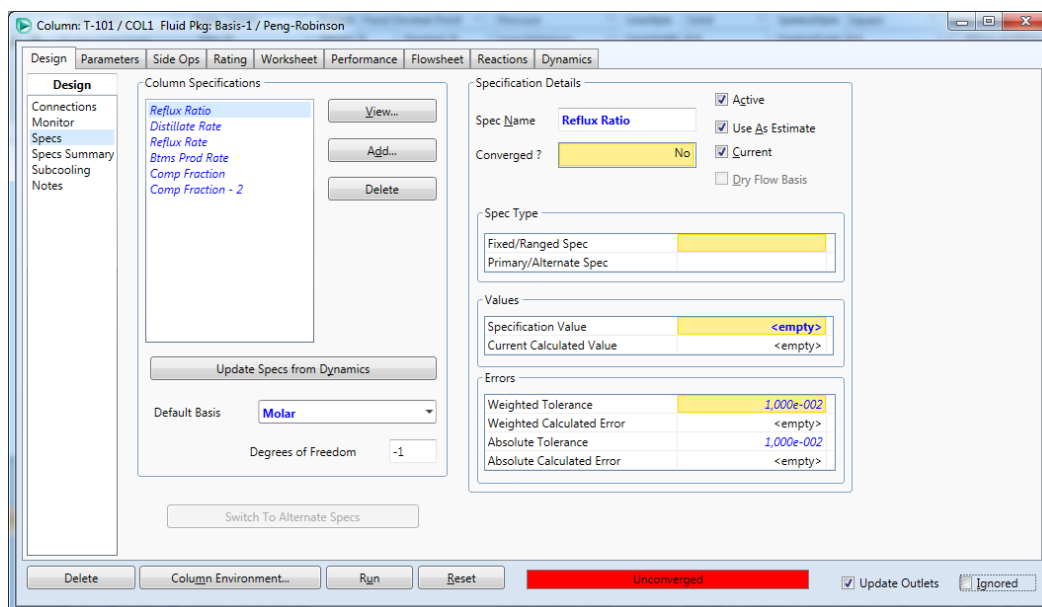
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Como observamos en la imagen la simulación aún no está completa ya que tenemos la franja en rojo con *Unconverged*, esto se debe a que todavía debemos indicar las especificaciones que deben cumplirse en la columna en la pestaña *Design*, en la opción *Specs*.



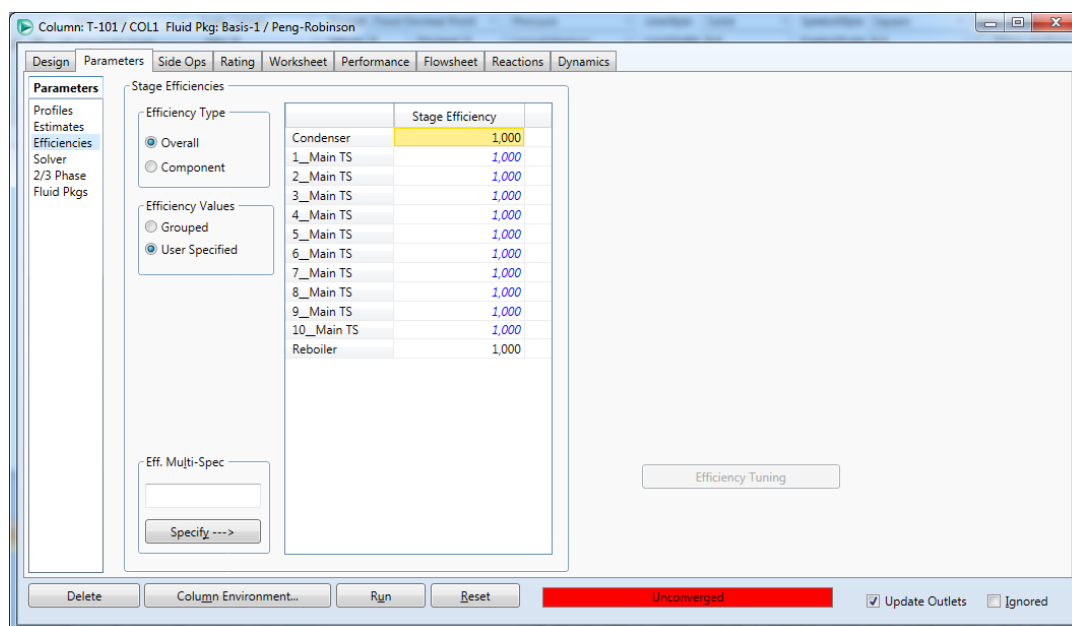
Se seleccionan las 3 especificaciones necesarias para obtener 0 grados de libertad en nuestro sistema. En este caso, se han elegido la composición del n-butano en fondo, composición de etil benceno en cabezas y la relación de reflujo.

Vemos que la opción *Reflux Ratio* ya está incluida, mientras que las especificaciones de composición debemos añadirlas nosotros pulsando *Add*, añadimos dos especificaciones del tipo *Component fraction*:

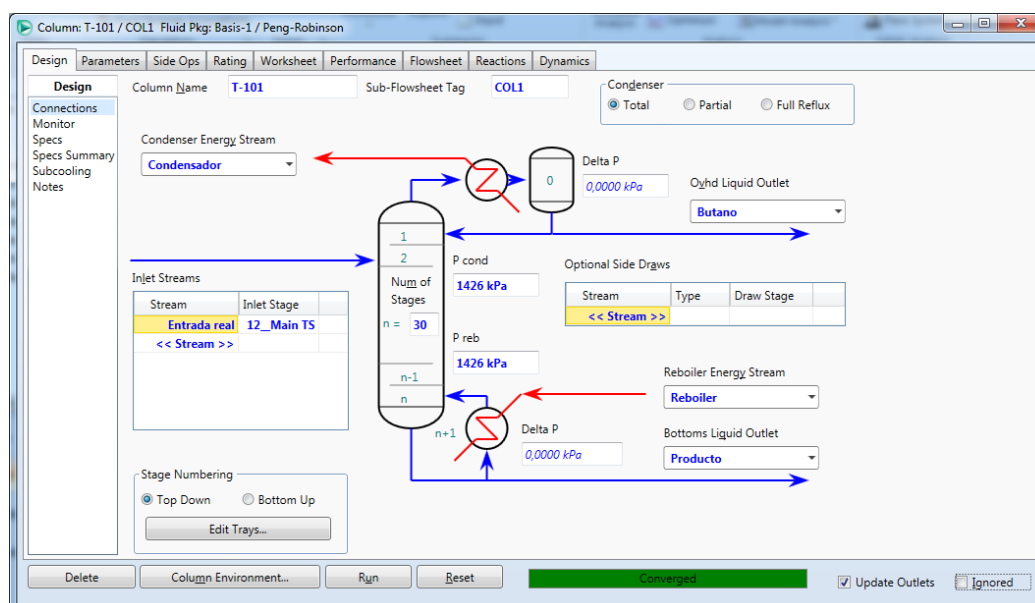


Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por último, hay que insertar los valores de la eficacia de plato que, en el caso del presente proyecto, mantiene el mismo valor para toda la columna porque se ha calculado de manera global. En nuestro diseño preliminar obtuvimos $E_g=0,4977$



Finalmente se pulsa la tecla Run para comenzar la simulación. Si nuestro sistema converge, el simulador proveerá de todos los datos (balances, reflujos, propiedades, etc) del sistema resuelto. Se puede jugar un poco con las variables y con la numeración de los platos para conseguir un resultado óptimo.



Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.6.3.-Resultados de la simulación

El simulador proporciona el balance de materia, que en este caso coincide con el diseño preliminar.

También provee los datos del balance de energía, el perfil de temperatura y de presiones, las condiciones y propiedades del líquido y del vapor en cada plato, etc.

En conclusión, todos los cálculos realizados hasta este punto han ayudado a ejecutar un óptimo uso del simulador obteniendo un resultado convergente del funcionamiento de la columna.

A partir de este momento los cálculos se realizarán con los datos que provee el simulador. Se nos presentan dos posibilidades diferentes, bien tomar los resultados del simulador para terminar de definir la torre completa o bien apoyarnos en algunos de los datos que nos devuelve el simulador para diseñar la torre de acuerdo a las ecuaciones típicas que encontramos en la bibliografía y empleando hojas de cálculo.

Con objeto de no extender más el presente proyecto y hacer un uso eficiente del simulador nos hemos decantado por realizar el diseño completo de la torre empleando la herramienta de simulación, de este modo se irán exponiendo a continuación los datos de interés que nos devuelve el programa típicos de una columna de rectificación.

3.2.6.3.1.-Balances de materia en la columna

Summary		
Feeds		
Flow Rate (kgmole/h)	439,2000	Composition
n-Butane(kgmole/h)	258,6044	0,5888
E-Benzene(kgmole/h)	15,9254	0,0363
BiPhenyl(kgmole/h)	21,6410	0,0493
n-C16(kgmole/h)	143,0293	0,3257
Products		
Butano(GLP)		
Flow Rate (kgmole/h)	233,9727	Composition
n-Butane(kgmole/h)	232,6983	0,9946
E-Benzene(kgmole/h)	1,0535	0,0045
BiPhenyl(kgmole/h)	0,1124	0,0005
n-C16(kgmole/h)	0,1086	0,0005
Producto(FCC)		
Flow Rate (kgmole/h)	205,2273	Composition
n-Butane(kgmole/h)	25,9209	0,1262
E-Benzene(kgmole/h)	14,8713	0,0725
BiPhenyl(kgmole/h)	21,5276	0,1049
n-C16(kgmole/h)	142,9146	0,6964

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.6.3.2.-Requerimiento energético

	Performance Feeds/Products						
	Stream	Type	Duty [kJ/h]	Phase	Flows[kg/h]	Enthalpy[kJ/kgmole]	Temperature [°C]
Condenser	Condensador Butano	Energy Draw	4707400	Liquid	233,97	-135700	96,76
1__Main TS							
2__Main TS							
3__Main TS							
4__Main TS							
5__Main TS							
6__Main TS							
7__Main TS							
8__Main TS							
9__Main TS							
10__Main TS							
11__Main TS							
12__Main TS	Entrada real	Feed		Liquid	439,2	-197900	130
13__Main TS							
14__Main TS							
15__Main TS							
16__Main TS							
17__Main TS							
18__Main TS							
19__Main TS							
20__Main TS							
21__Main TS							
22__Main TS							
23__Main TS							
24__Main TS							
25__Main TS							
26__Main TS							
27__Main TS							
28__Main TS							
29__Main TS							
30__Main TS							
Reboiler	Reboiler Producto	Energy Draw	25546000	Liquid	205,23	-167000	323,9

	Performance Cond/Reb	
	Condenser	Reboiler
Type	Total	Regular
Temperature[°C]	96,76	323,9
Pressure[kPa]	1426	1426
Duty[kJ/h]	4,71E+06	2,56E+07
Reflux Flowrate[kgmole/h]	3,861	205,2

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.6.3.3.-Propiedades físico-químicas

	Performance Trayed				
	Pressure				
		Delta P	Delta P(ht of liquid)	Dry Delta P (ht of liquid)	Pressure
		[kPa]	[mm]	[mm]	[kPa]
Section1	1__Main TS	0,3456	56,91	30,94	1426
	2__Main TS	0,3430	56,03	29,72	1426
	3__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	4__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	5__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	6__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	7__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	8__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	9__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	10__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	11__Main TS	0,3429	56,03	29,72	1426
	12__Main TS	0,5120	83,65	29,72	1426
Section2	13__Main TS	0,4389	71,70	16,65	1426
	14__Main TS	0,4389	71,69	16,64	1426
	15__Main TS	0,4388	71,69	16,64	1426
	16__Main TS	0,4388	71,69	16,64	1426
	17__Main TS	0,4388	71,68	16,63	1426
	18__Main TS	0,4388	71,68	16,63	1426
	19__Main TS	0,4388	71,68	16,62	1426
	20__Main TS	0,4388	71,67	16,62	1426
	21__Main TS	0,4387	71,67	16,61	1426
	22__Main TS	0,4387	71,66	16,61	1426
	23__Main TS	0,4387	71,66	16,60	1426
	24__Main TS	0,4386	71,65	16,59	1426
	25__Main TS	0,4386	71,64	16,59	1426
	26__Main TS	0,4386	71,63	16,58	1426
	27__Main TS	0,4386	71,62	16,61	1426
	28__Main TS	0,4391	71,60	16,86	1426
	29__Main TS	0,4416	71,47	18,05	1426
	30__Main TS	0,4256	68,87	11,38	1426

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Performance Tabular Profiles						
Vapour						
	Mass Flow	Gas Flow	Mole wt	Temperature	Density	Viscosity
	[kg/h]	[ACT_m3/h]		[°C]	[kg/m3]	[cP]
1__Main TS	13905,58	453	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
2__Main TS	13684,62	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
3__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
4__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
5__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
6__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
7__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
8__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
9__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
10__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
11__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
12__Main TS	13684,33	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
13__Main TS	13684,47	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
14__Main TS	13683,34	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
15__Main TS	13682,10	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
16__Main TS	13680,71	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
17__Main TS	13679,17	446	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
18__Main TS	13677,46	445	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
19__Main TS	13675,55	445	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
20__Main TS	13673,43	445	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
21__Main TS	13671,07	445	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
22__Main TS	13668,44	445	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
23__Main TS	13665,52	445	58,48	130,0	30,70	1,08E-02
24__Main TS	13662,26	445	58,48	130,1	30,70	1,08E-02
25__Main TS	13658,52	445	58,48	130,1	30,70	1,08E-02
26__Main TS	13653,61	445	58,48	130,2	30,68	1,08E-02
27__Main TS	13642,79	446	58,50	131,1	30,57	1,08E-02
28__Main TS	13593,18	455	58,68	137,4	29,85	1,09E-02
29__Main TS	13292,99	502	60,58	180,2	26,48	1,19E-02
30__Main TS	11852,35	355	99,65	323,9	33,40	1,47E-02

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Performance Tabular Profiles							
Liquid							
	Mass Flow	Liq Flow	Mole wt	Temperature	Density	Viscosity	Surf Ten
	[kg/h]	[m3/s]		[°C]	[kg/m3]	[cP]	[dyne/cm]
1__Main TS	4,76	0,000	113,7	127,7	619,1643	0,2571	8,734
2__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,2031	0,2722	9,047
3__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1733	0,2723	9,045
4__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
5__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
6__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
7__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
8__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
9__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
10__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
11__Main TS	4,47	0,000	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
12__Main TS	52449,69	0,023	119,4	130,0	624,1727	0,2723	9,045
13__Main TS	52448,57	0,023	119,4	130,0	624,1761	0,2723	9,045
14__Main TS	52447,32	0,023	119,4	130,0	624,179853	0,2723	9,046
15__Main TS	52445,93	0,023	119,4	130,0	624,184046	0,2723	9,046
16__Main TS	52444,39	0,023	119,4	130,0	624,188715	0,2723	9,046
17__Main TS	52442,68	0,023	119,4	130,0	624,193826	0,2723	9,047
18__Main TS	52440,78	0,023	119,4	130,0	624,199606	0,2723	9,047
19__Main TS	52438,65	0,023	119,4	130,0	624,206205	0,2723	9,047
20__Main TS	52436,29	0,023	119,4	130,0	624,2133	0,2724	9,048
21__Main TS	52433,67	0,023	119,4	130,0	624,221172	0,2724	9,048
22__Main TS	52430,75	0,023	119,5	130,0	624,229956	0,2724	9,049
23__Main TS	52427,48	0,023	119,5	130,0	624,239836	0,2724	9,050
24__Main TS	52423,74	0,023	119,5	130,0	624,251034	0,2724	9,050
25__Main TS	52418,83	0,023	119,5	130,1	624,265595	0,2725	9,051
26__Main TS	52408,01	0,023	119,5	130,1	624,29657	0,2725	9,053
27__Main TS	52358,40	0,023	119,7	130,2	624,436272	0,2727	9,062
28__Main TS	52058,22	0,023	120,6	131,1	625,307344	0,2739	9,120
29__Main TS	50617,58	0,022	126,3	137,4	630,029277	0,2783	9,465
30__Main TS	52781,53	0,023	152,6	180,2	630,19487	0,2619	10,665

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.6.3.4.-Vertedero

Performance Trayed							
Downcomer							
		DC Backup	DC Backup (lig ht)	DC Head Loss	DC Velocity	DC Design Vel.	DC Load Factor
		[%]	[mm]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[adim]
Section1	1__Main TS	17,69	107,8	1,65E-05	9,85E-06	0,1512	324,914
	2__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,792
	3__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,848
	4__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,850
	5__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,850
	6__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,848
	7__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,849
	8__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,853
	9__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,850
	10__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,850
	11__Main TS	17,54	106,9	1,65E-05	9,18E-06	0,1519	339,850
	12__Main TS	41,60	253,6	43,26	1,08E-01	0,1519	1,230
Section2	13__Main TS	36,5075	222,5	47,23	8,45E-02	0,1519	1,422
	14__Main TS	36,5065	222,5	47,23	8,45E-02	0,1519	1,422
	15__Main TS	36,5053	222,5	47,23	8,45E-02	0,1519	1,422
	16__Main TS	36,5041	222,5	47,22	8,45E-02	0,1519	1,422
	17__Main TS	36,5027	222,5	47,22	8,45E-02	0,1519	1,422
	18__Main TS	36,5011	222,5	47,22	8,45E-02	0,1519	1,422
	19__Main TS	36,4993	222,5	47,21	8,45E-02	0,1519	1,422
	20__Main TS	36,4974	222,5	47,21	8,45E-02	0,1519	1,422
	21__Main TS	36,4952	222,5	47,20	8,45E-02	0,1519	1,422
	22__Main TS	36,4928	222,5	47,19	8,45E-02	0,1519	1,422
	23__Main TS	36,4902	222,4	47,19	8,45E-02	0,1519	1,422
	24__Main TS	36,4871	222,4	47,18	8,44E-02	0,1519	1,422
	25__Main TS	36,4834	222,4	47,17	8,44E-02	0,1519	1,422
	26__Main TS	36,4765	222,4	47,14	8,44E-02	0,1519	1,423
	27__Main TS	36,4495	222,2	47,03	8,43E-02	0,1519	1,424
	28__Main TS	36,2932	221,2	46,37	8,37E-02	0,1521	1,431
	29__Main TS	35,5384	216,6	43,18	8,08E-02	0,1532	1,468
	30__Main TS	35,9739	219,3	46,93	8,42E-02	0,1523	1,425

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.6.3.5.-Inundación, arrastre y lloriqueo

Performance Trayed									
Flooding									
		Flooding	Vapour Load	Weir Load	Liq Ht Over Weir	Flood Capacity	Entrainment	Entrainment	Weep Velocity
		[%]	[ACT_m3/h]	[m3/h-m]	[mm]		[%]	[kg/h]	[m/s]
Section1	1 Main TS	47,67	103,4	7,93E-03	0,1125	0,4298	25,00	1,190	0,2025
	2 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,34	1,044	0,2076
	3 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	4 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	5 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	6 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	7 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	8 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	9 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	10 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	11 Main TS	46,72	101,4	7,39E-03	0,1074	0,4298	23,35	1,044	0,2076
	12 Main TS	70,11	101,4	8,66E+01	58,11	0,4298	0,05	25,046	0,2076
Section2	13 Main TS	55,45	101,4	76,22	52,82	0,4298	0,06	29,28	0,1953
	14 Main TS	55,45	101,4	76,22	52,82	0,4298	0,06	29,28	0,1953
	15 Main TS	55,45	101,4	76,22	52,82	0,4298	0,06	29,28	0,1953
	16 Main TS	55,44	101,3	76,21	52,82	0,4298	0,06	29,27	0,1954
	17 Main TS	55,44	101,3	76,21	52,81	0,4298	0,06	29,27	0,1954
	18 Main TS	55,43	101,3	76,21	52,81	0,4298	0,06	29,27	0,1954
	19 Main TS	55,43	101,3	76,20	52,81	0,4298	0,06	29,26	0,1954
	20 Main TS	55,42	101,3	76,20	52,81	0,4298	0,06	29,26	0,1954
	21 Main TS	55,41	101,3	76,20	52,81	0,4298	0,06	29,25	0,1954
	22 Main TS	55,40	101,3	76,19	52,80	0,4298	0,06	29,25	0,1954
	23 Main TS	55,39	101,2	76,18	52,80	0,4298	0,06	29,24	0,1954
	24 Main TS	55,38	101,2	76,18	52,80	0,4299	0,06	29,24	0,1954
	25 Main TS	55,37	101,2	76,17	52,79	0,4299	0,06	29,23	0,1955
	26 Main TS	55,36	101,2	76,15	52,78	0,4299	0,06	29,24	0,1956
	27 Main TS	55,35	101,3	76,06	52,74	0,4300	0,06	29,32	0,1961
	28 Main TS	55,36	102,0	75,52	52,48	0,4307	0,06	29,89	0,1999
	29 Main TS	55,34	105,2	72,88	51,20	0,4339	0,06	32,72	0,2199
	30 Main TS	49,67	83,9	75,97	52,70	0,4273	0,05	23,89	0,1890

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.6.4.-Resumen de resultados de interés en el diseño

Performance Results		
	Section 1	Section 2
Internals	Sieve	Sieve
Number of Flow Paths	1	1
Jet Flooding Method	Glitsch	Glitsch
Column Geometry		
Section Diameter [m]	1,067	1,219
X-Sectional Area [m ²]	0,894	1,167
Hole Area [m ²]	4,64E-02	6,20E-02
Active Area [m ²]	0,4601	0,6150
DC Area [m ²]	0,2169	0,2762
Tray Spacing [m]	0,6096	0,6096
Section Height [m]	7,315	10,973
Hydraulic Results		
Max Flooding [%]	70,11	55,45
Max DC Backup [%]	41,60	36,51
Max DP/Tray [kPa]	0,512	0,442
Section DeltaP [kPa]	4,287	7,887
Max Weir Load [m ³ /h-m]	86,65	76,22
Tray Details		
Total Weir Length [mm]	969,8	1102,4
Weir Height [mm]	50,8	50,8
DC Clearance [mm]	38,1	38,1
Side Weir Length [m]	0,9698	1,1024
Estimated # of Holes/Valves	1464	1956
Side DC Top Width [mm]	311,2	349,3
Side DC Btm Width [mm]	311,2	349,3
Side DC Top Length [m]	0,9698	1,1024
Side DC Btm Length [m]	0,9698	1,1024
Side DC Top Area [m ²]	0,2169	0,2762
Side DC Btm Area [m ²]	0,2169	0,2762
Flow Length [mm]	444,5	520,7
Flow Width [mm]	1035	1181

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.7.-Diseño mecánico de la torre

3.2.7.1.-Material empleado

Según las condiciones en las que opera la torre, el carácter no corrosivo de los compuestos a separar y sus propiedades se decide utilizar acero al carbono SA 285 Gr C como material de la envolvente de la columna al igual que para los platos perforados.

3.2.7.2.-Determinación del espesor de la envolvente

Las diferentes tensiones posibles a las que se somete un recipiente a presión son:

- ✓ Tensiones de tracción por presión interior en el recipiente, tanto en sentido longitudinal como en le circunferencial.
- ✓ Tensiones de tracción y compresión longitudinales debidas al viento.
- ✓ Tensiones de tracción y compresión longitudinales por seísmos.
- ✓ Tensiones de compresión por el peso de la columna.

La tensión debida a seísmos suele considerarse como despreciable frente a la tensión originada por la presión interna. Además, según la norma, no se consideran simultáneamente viento y seísmo, y el viento es por lo general un factor de mayor peso. Por otro lado, se decide obviar el peso de la columna ya que, de manera general, la compresión debida a este es insignificante y no es de carácter controlador. De este modo nos encontramos con que sólo se consideran la presión debida al viento y la presión interna de la torre.

3.2.7.2.1.-Determinación del espesor según la presión interna

Según el código ASME VIII División 1 para equipos a presión es necesario calcular el espesor de la envolvente cilíndrica dependiendo tanto de la tensión circunferencial como de la longitudinal que se produce en estos. Posteriormente se tomará en consideración el mayor de los espesores calculados.

Las tensiones mencionadas se determinan a partir de las siguientes expresiones:

- ✓ Tensión circunferencial:

$$t_{circ} = \frac{P_d R}{\sigma E - 0,6 P_d} \quad [A3.23]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Tensión longitudinal:

$$t_{long} = \frac{P_d R}{2\sigma E + 0,4P_d} \quad [A3.24]$$

Donde:

P_d (psi): presión de diseño para toda la columna

R: radio de la columna

T_d : temperatura de diseño

σ (psi): tensión máxima admisible

E: coeficiente de soldadura

C: desgaste a la corrosión

Se calculan a continuación cada uno de estos valores:

- P_d (psi): presión de diseño para toda la columna

Se calcula eligiendo el mayor de los siguientes valores: la presión máxima de operación que se da en la columna más el 10%, la presión máxima más 2 kg/cm² o 3,5 kg/cm².

$P_{operación}$ [kg/cm ²]	14,536
P_{d1} [kg/cm ²]	15,9896
P_{d2} [kg/cm ²]	16,536
P_{d3} [kg/cm ²]	3,5

Nos quedamos con la mayor de las presiones posibles y la expresamos en psi:

$P_{diseño}$ [psi]	227,503
--------------------	---------

- R: radio de la columna

Se calcula como la mitad del valor del diámetro de la columna, cuyo valor conocemos gracias al simulador

R [m]	0,61
-------	------

- T_d : temperatura de diseño

Se toma el mayor de los valores de temperaturas de operación y se le añaden 20 °C.

T_d [°F]	356,36
T_d [°C]	200,2

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- σ (psi):tensión máxima admisible

Se recoge en las tablas de materiales del Código ASME y depende de la temperatura de diseño. Para acero inoxidable SA 285 C a una temperatura de hasta 400°F se tiene que la tensión es igual a 15700psi (ver **tabla A8.3 del anexo 8**).

- E:coeficiente de soldadura

Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por la tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es de 0,85(véase **tabla A8.7 del anexo 8**).

- C:desgaste a la corrosión

Esta variable depende fundamentalmente de dos criterios. Por un lado la vida deseada de un recipiente es una cuestión económica, así los recipientes principales o mayores se diseñan para una vida larga (15 a 20 años) mientras que los secundarios para períodos menores (8 a 10 años). Y en segundo lugar, se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria para este tipo de recipientes.

$$C = 0,005 \text{ in} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 2,54 \text{ mm}$$

Una vez hallamos seleccionado el espesor que vamos a emplear en nuestra torre debemos sumar este desgaste por corrosión para obtener el valor final.

Pues bien, los valores de la tensiones ya calculadas son:

$t_{\text{circ}}[\text{in}]$	0,414
$t_{\text{long}}[\text{in}]$	0,204

Por tanto el valor con el que vamos a trabajar a partir de ahora es el de t_{circ} más el valor del desgaste por corrosión:

Espesor[in]	0,514
-------------	-------

3.2.7.2.2.-Esfuerzo debido a la carga de viento

Al igual que la presión interna, el viento produce unas tensiones en las paredes del recipiente que pueden producir la inestabilidad mecánica del mismo. Por tal motivo, se calculan los espesores requeridos para soportar los esfuerzos generados como consecuencia de las cargas del viento. No todo el recipiente va a estar sometido de la misma manera por la carga del viento, ya que a mayor altura, menos momento. Por lo tanto se calcula la carga en la junta del faldón con la envolvente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

La expresión para el cálculo del espesor es:

$$t_{viento} = \frac{12M_{exp}}{R^2 \pi \sigma E} \quad [A3.25]$$

Donde:

- R es el radio de la envolvente incluyendo el espesor del aislante

R[in]	24,530
-------	--------

- σ es la tensión admisible citada anteriormente:

σ [psi]	15700
----------------	-------

- E es el factor de soldadura con un valor de:

E[adim]	0,85
---------	------

- M_{exp} es el momento de la altura de la posición a analizar (lb·ft)

El momento debido al viento para las posiciones a analizar se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M_{exp} = M - h_{exp} (V - 0,5 P_w D_o h_{exp}) \quad [A3.26]$$

Siendo:

- M_{exp} el momento a la altura expuesta en las diferentes posiciones a estudio (h_{exp}).

- h_{exp} la altura donde se va a estudiar la tensión del viento

- P_w la presión de diseño del viento

El término P_w viene dado por la siguiente expresión:

$$P_w = q_s C_q C_e \quad [A3.27]$$

Dónde:

- q_s es la presión de estancamiento del viento. Puesto que en nuestro caso particular la planta no está ubicada en una zona concreta tomaremos el peor de los valores posibles para de este modo asegurar el funcionamiento de nuestro diseño en cualquier condición posible.

Teniendo en cuenta la **tabla A8.15 del anexo 8** se obtiene una presión de estancamiento de:

q_s [lb/ft ²]	32,44
-----------------------------	-------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- C_q es el coeficiente de presión que depende del factor de forma. Para torres cilíndricas con equipos conectados se recomienda que tenga un valor de: (véase **tabla A8.16 del anexo**).

$C_q[\text{adim}]$	0,9
--------------------	-----

- C_e es el coeficiente de factor por ráfagas. Se considera exposición de tipo C ya que se trata de una exposición severa, en terreno plano y abierto. La altura definida se encuentra en un rango entre 0 y 20 pies, así que según la **tabla A8.17 del anexo**, el valor de C_e es de:

$C_e[\text{adim}]$	1,2
--------------------	-----

De esta manera para la posición a estudiar:

$P_w[\text{lb/ft}^2]$	35,0352
-----------------------	---------

- D_o , el diámetro exterior de la carcasa incluyendo el espesor del material aislante.

Se fija el espesor del material aislante en función de la temperatura de operación de la torre. Según la **tabla A8.14 del anexo 8**, el espesor de lana de roca necesario para la temperatura de diseño de la columna es de:

espesor aislante[mm]	80
espesor aislante[in]	3,1496

- V , el esfuerzo cortante(lb)

El valor de esta variable se obtiene a partir de la expresión:

$$V = P_w D_o H \text{ [A3.28]}$$

Siendo H la altura de la torre no incluyendo el faldón:

H[m]	19
H[ft]	62,336

De manera que el esfuerzo cortante tendrá un valor de:

$D_o[\text{in}]$	55,359
$D_o[\text{ft}]$	4,613
$V[\text{lb}]$	10073,489

M, el momento máximo que se da en la base. Viene dado por la siguiente ecuación.

$$M = V \cdot h_1 \text{ [A3.29]}$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Siendo h_1 el brazo de palanca que es la mitad de la altura con faldón (H) y teniendo un valor igual a:

h_1 [ft]	31,168
------------	--------

Por lo tanto ya podemos conocer los valores del momento máximo, el momento expuesto y del espesor de envolvente para cargas de viento.

M[lb·ft]	313970,50
M_{exp} [lb·ft]	266355,533
t_{viento} [in]	0,1267
t_{viento} [mm]	3,218

El espesor máximo necesario es 0,1267 in al que se le suma la corrosión obteniéndose un valor de espesor de 0,2267 in aproximadamente.

En conclusión, el espesor total es la suma del mayor según la presión interna, el espesor según la carga del viento y la corrosión, quedando un valor de:

$t_{carcasa}$ [in]	0,640
$t_{carcasa}$ [mm]	16,256

Se comprueba que este espesor hallado es mayor que el espesor determinado por norma:

— Exigido por el código ASME VIII-1:

$$t_{min}(mm) = 2,5 + C = 2,5 + 2,54 = 5,04 mm = 0,198 in$$

— Según la fórmula para aceros:

$$t_{min}(mm) = 3 mm = 0,118 in$$

Por lo tanto el espesor mínimo para la envolvente será el calculado, es decir, 16,256 mm. Comercialmente se toma el valor inmediatamente superior, atendiendo a la **tabla A8.18** del anexo 8:

$$t_{carcasa} = 11/16 in = 17,5 mm$$

3.2.7.2.3.-Determinación del espesor de los fondos

La columna de rectificación, está provista de un cabezal superior e inferior. Ambas cubiertas son de tipo tori esférica, por ser las más comunes en la industria. Dentro de este tipo

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

de tapas existen las de tipo Kloppe y Korbogen. Si no se dan ninguna de las condiciones siguientes el fondo será toriesférico de tipo Koppeler, si se cumple alguna será de Korbogen.

- ✓ Presión de diseño igual o superior a 7 kg/cm².
- ✓ Temperatura de diseño superior a 350°C.
- ✓ Fondos inferiores de recipientes verticales cuya relación altura/diámetro sea superior a 10.

Teniendo en cuenta las características de la columna que vamos a diseñar llegamos a que ambos fondos son de tipo Korbogen debido a que nuestra presión de diseño es superior a 7kg/cm² tanto en la sección de rectificación como en la de agotamiento.

a) Fondo superior: toriesférico tipo Korbogen.

Para este tipo de fondo existen diferentes fórmulas simplificadas para calcular las dimensiones características del cabezal (Código ASME).

- Radio mayor(L):

$$L = 0,8D_i \text{ [A3.30]}$$

- Radio menor(r):

$$r = 0,154D_i \text{ [A3.31]}$$

- Altura de la cúpula(h):

$$h = 0,26 \cdot D_i \text{ [A3.32]}$$

En la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos tras operar:

Di[m]	1,067
L[m]	0,854
r[m]	0,164
h[m]	0,277

Calculadas estas dimensiones, nos disponemos a determinar el espesor de la cúpula según el código ASME a partir de la siguiente ecuación:

$$t_{fi} = \frac{MP_d L}{2\sigma E - 0,2P_d} \text{ [A3.33]}$$

Siendo M un parámetro que depende de las dimensiones de la tapa toriesférica:

$$M = \frac{1}{4} \left[3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right] \text{ [A3.34]}$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Debemos tener en cuenta que existe una relación para determinar el volumen del cabezal, de modo que:

$$Volumen = 0,13D_i^3 [A3.35]$$

h[m]	0,277
M	1,320
σ [psi]	15700
E[adim]	0,85
P_d [psi]	227,503
t_{fi} [in]	0,379
t_{fi} [mm]	9,619
$V[m^3]$	0,158

b) Fondo inferior: toriesférico tipo Korbogen

Siguiendo los mismos pasos que para el fondo superior se obtuvieron los siguientes resultados que se recogen tabulados:

Di[m]	1,219
L[m]	0,975
r[m]	0,188
h[m]	0,317
M	1,320
σ [psi]	15700
E[adim]	0,85
P_d [psi]	227,503
t_{fi} [in]	0,433
t_{fi} [mm]	10,991
$V[m^3]$	0,235

3.2.7.2.4.-Elección final del espesor

Toda la columna presentará un espesor constante, siendo este el mayor de los requeridos en cada sección. Se tendrán en cuenta las suma del espesor necesario para cargas de presión interna y de viento.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Se presenta una tabla con el resumen de todos los valores obtenidos:

Espesores[in]	Presión interna		Viento	Espesor total
	T.longitudinal	T.circunferencial		
Columna	0,204	0,414	0,1267	0,640
Fondo superior	0,3787		despreciable	0,479
Fondo inferior	0,4327		0,1267	0,659

Como podemos observar la zona de la columna que requiere un mayor espesor es el fondo inferior con un espesor mínimo de 0,659 in, valor que ya tiene añadido el factor por corrosión. Por lo tanto el espesor mínimo de la envolvente debe ser de:

Espesor min envolvente[in]	0,659
Espesor min envolvente[mm]	16,739

Se selecciona el espesor seguidamente mayor en la tabla de espesores comerciales para recipientes y es exactamente el mismo para toda la envolvente de la columna:

Espesor comercial envolvente[mm]	17,500
----------------------------------	--------

3.2.7.3.-Cálculo de la altura de la faldilla

La faldilla es una sección cilíndrica por la cual se realizará la soldadura que une los fondos inferior y superior de la columna. La colocación de esta pestaña tiene por objetivo evitar que la soldadura se realice por la línea de tangencia o línea de transición de la figura bombeada de los fondos a la carcasa, ya que esta línea está sometida a grandes tensiones axiales que lo convierten en el punto más débil de todo el recipiente.

La altura de la faldilla no debe ser menor que el mayor de los siguientes valores:

$$h \geq 0,3\sqrt{D_o e} \quad [A3.36]$$

$$h \geq 3e \quad [A3.37]$$

$$h \geq 25 \text{ mm} \quad [A3.38]$$

Donde el espesor de pared (e) vale 17,5 mm y el diámetro exterior (Do) es 1406,144 mm. Sustituyendo los valores en las ecuaciones tenemos:

$$h \geq 0,3\sqrt{1406,144 \cdot 17,5} \geq 47,06 \text{ mm}$$

$$h \geq 3 \cdot 17,5 \geq 52,5 \text{ mm}$$

$$h \geq 25 \text{ mm}$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El mayor de los valores es el correspondiente a una altura de 52,5 mm para ambas faldillas.

2.7.4.-Altura total de la columna de rectificación

La columna está compuesta, en primer lugar, por la envolvente que ha sido calculada mediante el empleo del simulador y consta de todo el cilindro donde se encuentran los platos. Luego, hay que añadirle las alturas de los fondos interior y superior que también se encuentran diseñados en el simulador y cuyos valores se encuentran añadidos en los valores de altura de cada una de las secciones (ver apartado 2.6.4). Por último las alturas de las faldillas que unen la envolvente con los fondos que también se desarrollaron en el apartado anterior. Por lo que la altura de la columna es:

$$H_{total} = H_{envolvente} + H_{fondosuperior} + H_{fondoinferior} + H_{faldillainferior} + H_{faldillasuperior}$$

[A3.39]

Sustituyendo los valores pertinentes se obtiene:

$H_{total}[m]$	18,987
----------------	--------

3.2.7.5.-Soporte de la columna

Las columnas están diseñadas como unidades autosoportadas mediante el uso de faldones, aunque también existen patas, silletas y consolas. El uso de faldones está sujeto a alguna de las siguientes condiciones:

- Cuando el diámetro de la envolvente sea superior a 1,5 m.
- Cuando la esbeltez del recipiente sea mayor de 5.
- Cuando puedan esperarse vibraciones
- Cuando el peso del recipiente lleno de agua sea superior a 15000 kg.

Por lo tanto, la columna que se está diseñando cumple al menos una de las condiciones tanto en la zona de rectificación como en la de agotamiento.

El soporte será un faldón que irá soldado al fondo inferior de forma que los diámetros medios del faldón y de la envolvente coincidan. En ningún caso el faldón será soldado al exterior de la envolvente y dispondrá de al menos, una abertura de acceso. Para diámetros de faldón igual o menor a 2,5 metros, se utilizará una sola abertura como es en el caso de la presente torre.

El faldón tendrá una altura de 1,5 metros según normativa y teniendo en cuenta las características de nuestra torre.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.2.7.6.-Aislamiento

Para el aislamiento de la columna se usará lana de roca, ya que cubre las necesidades técnicas de la columna y se trata de un material que de forma económica cumple los requerimientos del proceso y del recipiente; estarán cubiertas a su vez de una placa de aluminio. Los espesores estándar para la lana de roca se representan en la **tabla A8.14** del anexo 7 en función del rango de temperatura de operación.

Por tanto, para una temperatura máxima de operación de la torre de hasta 202,2°C, se obtiene un espesor de lana de roca de 80 mm.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ANEXO4.-EQUIPOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

4.1.-Diseño del calderín

4.1.1.-Introducción

Se diseña un intercambiador de calor para producir vapor en la torre. Tal y como se justifica en la Memoria Descriptiva, se selecciona un rehervidor del tipo Kettle, caracterizado por la configuración en casco.

A continuación se indican los pasos básicos que se llevan a cabo tanto en el dimensionamiento como en el diseño mecánico del calderín.

4.1.2.-Caracterización de las corrientes

Al reboiler llega la corriente de líquido procedente del último plato de la torre a 180,2 °C con el objetivo de vaporizar aún más la corriente que retorna a la zona inferior de la columna, las corriente sale a 323,9 °C, utilizando para ello aceite térmico THERMINOL 66.

El fluido frío es el que proviene de la columna y se caracteriza por las siguientes propiedades:

Fluido frío	
Viscosidad media(μ_{ff})[cP]	0,1801
Densidad media(ρ_{ff})[kg/m ³]	572,945
Temperatura de entrada($T_{f,o}$)[°C]	180,2
Temperatura de salida($T_{f,L}$)[°C]	323,9
Temperatura media($T_{f,m}$)[°C]	252,05

En cuanto al fluido calefactor utilizado se presentan las siguientes propiedades:

Fluido calefactor	
Viscosidad media(μ_{fc})[cP]	0,333
Densidad media(ρ_{fc})[kg/m ³]	773
Temperatura de entrada($T_{c,o}$)[°C]	360
Temperatura de salida($T_{c,L}$)[°C]	327
Temperatura media($T_{f,m}$)[°C]	343,5
Calor de vaporización(λ)[kJ/kg]	273,89
Capacidad calorífica(C_p)[kJ/kgK]	2,736
Conductividad térmica(K)[W/mK]	0,0889

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Los datos del fluido frío se han tomado del simulador AspenTech HYSYS al realizar la simulación de la línea de proceso y realizando la medida entre los distintos valores de las corrientes. Los del fluido caliente, a partir de la hoja de especificaciones del Therminol 66 con la temperatura media entre las corrientes de entrada y salida que, basándose en la experiencia, para este tipo de calefactor es conveniente un salto térmico de entre 20 y 30 °C.

4.1.3.-Selección del tipo de intercambiador

El intercambiador de calor que se elige como equipo auxiliar de la torre de rectificación es de tipo Kettle. En este rehervidor, se vaporiza parcialmente la corriente líquida de salida de la torre, mediante una corriente de aceite calefactor que circula por los tubos. Este intercambiador se caracteriza por la configuración en casco. Se compone de un conjunto de tubos en U y de un vertedero a la derecha que mantiene el líquido hirviendo sobre los tubos. El vapor sale por la tobera superior y el líquido caliente por la tobera inferior. A continuación se muestra un esquema de este intercambiador, el cual indica las características más relevantes de los reboilers inundados.

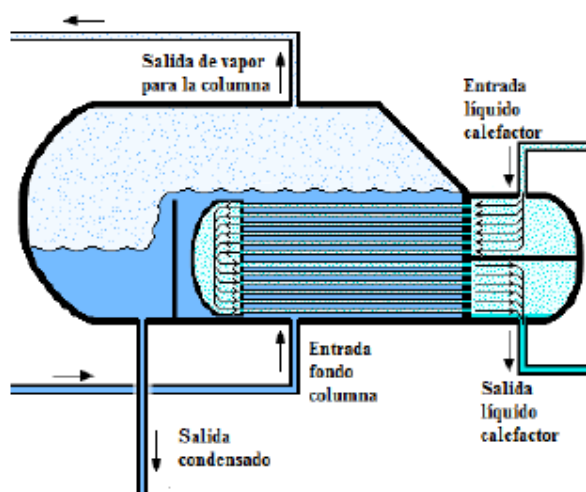


Figura 1.-Intercambiador de calor tipo Kettle (reboiler inundado)

4.1.4.-Asignación de flujos

Para el caso que nos concierne el fluido a evaporizar circula por la carcasa y, como se indicó anteriormente, el vapor sale por la tobera superior y el líquido caliente por la tobera inferior. Por lo tanto el aceite circulará por los tubos interiores.

4.1.5.-Cálculo del calor intercambiado

El balance de energía al intercambiador es el siguiente:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [A4.1]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde:

·Q [kJ/h], es el calor intercambiado entre los fluidos

· \dot{m} [kg/h]; es el caudal másico de los diferentes fluidos, así será \dot{W}_{fc} para el fluido caliente y \dot{L}' para el fluido frío proveniente de la columna.

· C_p [kJ/kg·K], es el calor específico para cada fluido

· ΔT [K o °C]; es la variación de temperatura que experimenta cada corriente.

El calor intercambiado entre los fluidos se obtiene del simulador, y tiene un valor de $2,555 \cdot 10^7$ kJ/h.

4.1.6.-Características de los tubos y material empleado

Se eligen tubos de calibre BWG 12 con un diámetro exterior igual a 0,75 in y uno interno de 0,64 in. Ésta decisión será demostrada más adelante en la sección del cálculo del espesor de tubos. La configuración es triangular de una pulgada de Pitch.

El material empleado es acero al carbono SA-285 C para la carcasa y SA-106 B para los tubos.

4.1.7.-Diferencia de temperatura media logarítmica

Esta variable refleja la diferencia media de la temperatura entre las corrientes fría y caliente a lo largo del intercambiador. Para flujo en contracorriente, la expresión que determina su valor es la siguiente:

$$LMTD = \frac{(T_{c,L} - T_{f,L}) - (T_{c,o} - T_{f,o})}{\ln \left(\frac{T_{c,L} - T_{f,L}}{T_{c,o} - T_{f,o}} \right)} \quad [A4.2]$$

Sustituyendo los valores de temperatura de los fluidos en la expresión tenemos:

La LMTD ha sido calculada para una disposición de flujo en contracorriente pura. Sin embargo, el diseño es de un intercambiador con un paso por carcasa y dos pasos por tubos, que se caracteriza por un flujo correspondiente a una mezcla de contracorriente y corrientes paralelas. Por tal motivo, es necesario el cálculo del término F, el cual corrige las posibles desviaciones de la LMTD.

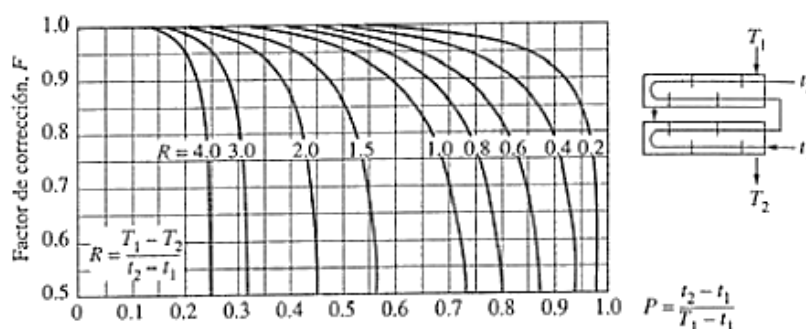
Los valores se representan en la figura que se expone a continuación, en función de las variables P y R, la cuales se determinan con las siguientes expresiones:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$P = \frac{T_{c,L} - T_{c,o}}{T_{f,o} - T_{c,o}}$$

$$R = \frac{T_{f,o} - T_{f,L}}{T_{c,L} - T_{c,o}}$$

[A4.3] [A4.4]



b) Dos pasos por el casco y 4, 8, 12, etc. (cualquier múltiplo de 4) pasos por los tubos

Figura 2.-Gráfica para determinar el factor de corrección intercambiador (CV)

Por lo tanto la diferencia de temperatura media logarítmica se calcula como:

$$\Delta T_m = F \cdot LMTD \quad [A4.5]$$

Una vez que se dispone de este valor, se obtiene el valor del producto $U \cdot A_{transf}$. En la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos:

$T_{c,L} [^{\circ}C]$	327	P	0,18
$T_{f,L} [^{\circ}C]$	323,9	R	4,35
$T_{c,o} [^{\circ}C]$	360	F	0,97
$T_{f,o} [^{\circ}C]$	180,2	$\Delta T_m [^{\circ}C]$	42,21
LMTD[$^{\circ}C$]	43,52	$U \cdot A_{transf} [W/K]$	168106,9

4.1.8.-Suposición del número de tubos del intercambiador.

Inicialmente, hay que partir de un número de tubos arbitrario que se calcula relacionando el caudal másico de aceite necesario y el que puede ir por un tubo.

En primer lugar se calcula el caudal másico del aceite térmico necesario para satisfacer los requerimientos energéticos. Teniendo en cuenta que el calor absorbido por la corriente parafínica es igual al aportado por el Therminol, resulta:

$$Q_{int} = C_{po} M_o (T_{c,o} - T_{c,f}) \quad [A4.6]$$

A continuación se selecciona una supuesta velocidad del aceite en la tubería. Teniendo en cuenta que es un fluido de gran viscosidad esta velocidad puede rebajarse hasta 0,06 m/s pero nunca ser mayor de 2,4 m/s, ya que aparecerían problemas de corrosión y erosión. Por lo tanto, se selecciona una velocidad inicial igual a 1,8 m/s.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Así mismo, el caudal másico de aceite por tubo corresponde a la siguiente ecuación:

$$W_{fctubo} = \rho_{fc} v_o A_{it} \quad [A4.7]$$

Por lo tanto el número de tubos totales es:

$$n_t = \frac{W_{fc}}{W_{fctubo}} \quad [A4.8]$$

Los datos que se han obtenido se recogen en la siguiente tabla:

W_{fc} [kg/h]	2,83E+05
W_{fctubo} [kg/s]	0,289
W_{fctubo} [kg/h]	1039,6
Densidad (ρ_{fc})[kg/m ³]	773
v_o supuesta[m/s]	1,8
v_o calculada[m/s]	1,74
A_{it} [m ²]	2,08E-04
nº tubos calculado	272,16
nº tubos calc	273
$W_{fctubo} \text{ recalculado}$ [kg/h]	1003,3
$W_{fctubo} \text{ recalculado}$ [kg/s]	0,279

Los intercambiadores de carcasa y tubo comerciales no se construyen para cualquier número de tubos, sino con el estandarizado. Estos valores se muestran en la **tabla A8.19 del anexo 8**.

Se selecciona la columna de tubos con 0,75 in de diámetro, 1 in de Pitch y 4 pasos. Es necesario multiplicar este número por 4 para tener en cuenta los 4 pasos por tubo. El número de tubos inmediatamente superior es 1128, lo que significa que se tienen 282 tubos en vez de los 273 determinados empleando las ecuaciones.

Siendo el caudal del aceite en el tubo:

$$W_{fctubo} = \frac{W_{fc}}{n_t} \quad [A4.9]$$

Así mismo, la velocidad en el tubo es:

$$v_o = \frac{W_{fctubo}}{\rho_{fc} A_{it}} \quad [A4.10]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Con estas expresiones hemos determinado los valores de v_o calculada y W_{fc} tubo recal., que se muestran en la tabla anterior.

4.1.9.-Coeficiente global de intercambio de calor

El coeficiente global de transferencia de calor es el factor que engloba las resistencias con las que se encuentra el flujo de calor. En este caso:

- Resistencia a la convección del fluido exterior del tubo e igual a la inversa del coeficiente de película externa:

$$R_o = \frac{1}{h_o} \quad [A4.11]$$

- Resistencia a la convección del fluido interior del tubo e igual a la inversa del coeficiente de película interna:

$$R_i = \frac{1}{h_i} \quad [A4.12]$$

- Resistencia debida a la película de ensuciamiento depositada en el exterior del tubo (R_{s_o}).
- Resistencia debida al ensuciamiento depositado en el interior del tubo (R_{s_i}).
- Resistencia a la conducción debida a la pared metálica del tubo (R_m):

$$R_m = \frac{D_o \ln(r_o/r_i)}{2K_m} \quad [A4.13]$$

Como estas resistencias se expresan en m^2/W , es necesario referir todos los términos a la misma superficie. Conviene elegir la superficie exterior del tubo, lo que lleva a corregir las resistencias interiores, quedando finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i D_i} + R_{s,i} \frac{D_o}{D_i} + \frac{D_o \ln(r_o/r_i)}{2K_m} + R_{s,o} + \frac{1}{h_o} \quad [A4.14]$$

Por lo tanto, para estimar el coeficiente global de transferencia de calor es imprescindible calcular cada uno de estos coeficientes individuales.

4.1.9.1.-Coeficiente de película interna (h_i)

El cálculo del coeficiente se realiza despejándolo a partir de la definición del número de Nusselt (Nu):

$$Nu = \frac{h_i D_i}{k} \quad [A4.15]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

A su vez, el número de Nusselt se puede obtener a partir de una serie de correlaciones que desarrollan la convección para flujo interno en tubos circulares. La elección de la ecuación apropiada depende del valor del número de Reynolds y del Prandtl, por lo tanto el primer paso es realizar el cálculo de éstos.

El número de Reynolds (Re) para un banco de tubos es:

$$Re = \frac{4W_{f,c}}{\mu\pi D_i N_t} \quad [A4.16]$$

El número de Prandtl es un número adimensional igual a:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad [A4.17]$$

Se procede a elegir la correlación más adecuada para nuestro caso particular bajo estudio. Se selecciona la siguiente ecuación donde el número de Prandtl debe situarse entre 0,6 y 160 y el Reynolds ser mayor que 10000.

$$Nu = 0,023(Re)^{4/5} Pr^{0,4} \quad [A4.18]$$

Así se obtiene el valor del número de Nusselt y, por último, se halla el valor del coeficiente de película interna sustituyendo en la ecuación de h_i .

$W_{fc}[\text{kg/s}]$	78,59
Viscosidad (μ_{fc})[Pa·s]	3,33E-04
$D_i[\text{m}]$	0,02
nt	282
Re[adim]	6,56E+04
Capacidad calorífica(C_p)[J/kgK]	2736
Conductividad térmica(K)[W/mK]	0,09
Pr[adim]	10,25
Nu[adim]	416,17
$h_i[\text{W/m}^2\text{K}]$	2275,90

4.1.9.2.-Coeficiente de película externa (h_o)

Como ya se ha indicado antes, en la carcasa de la caldera la corriente líquida que llega desde la torre se evapora parcialmente al tomar calor del fluido que circula por los tubos. El mecanismo de transferencia de calor típico que se da en las calderas de tipo Kettle es la ebullición nucleada, donde las altas tasas de transferencia de calor por unidad de área se obtiene principalmente como resultado de la formación de burbujas en la interfaz entre el líquido y el sólido.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Existen diferentes ecuaciones para obtener valores razonables de coeficientes de película en la zona de ebullición nucleada. En este caso, se ha seleccionado la ecuación propuesta por Mostinski (Perry, 1997):

$$h_o = 3,75 \cdot 10^{-5} P_c^{0,69} \left(\frac{Q_{int}}{A_{transf}} \right)^{0,7} \left[1,8 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0,17} + 4 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{1,2} + 10 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{10} \right] \quad [A4.19]$$

Donde P_c se evalúa para el líquido que sale del calderín. Sustituyendo en la expresión se tiene.

P[Pa]	1426000
P_c [Pa]	2133058,436
Q_{int} [kJ/h]	25546000
Q_{int} [W]	7,10E+06
(P/P_c) [adim]	0,669

Quedando el coeficiente de película externa con la expresión siguiente:

$$h_o = \frac{235984}{A_{transf}^{0,7}} \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad [A4.20]$$

En principio, se trabajará con el valor de h_o en función del área de transferencia.

4.1.9.3.-Factores de ensuciamiento interno ($R_{s,i}$) y externo ($R_{s,o}$).

El ensuciamiento en los tubos tanto interior como exteriormente reduce la cantidad de calor transmitida. Estas resistencias se toman de las tablas de las normas TEMA, que gracias a la experiencia industrial, establecen los valores de $R_{s,i}$ y $R_{s,o}$ para una amplia gama de productos industriales. A continuación se muestran las resistencias de ensuciamiento en ($h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F / Btu$) de las sustancias de interés.

Se considera como fluido similar al aceite térmico el “quench oil” que es el aceite con mayor resistencia de ensuciamiento y para la corriente de gasoil tomamos su valor, de este modo:

$R_{s,i}$ [m ² K/W]	7,04E-04
$R_{s,o}$ [m ² K/W]	4,40E-04

4.1.9.4.-Conductividad térmica del material

La conductividad térmica para el acero al carbono SA-106 B se toma de la bibliografía a una temperatura máxima de las corrientes (T=350°C):

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$K_m = 32,73 \frac{W}{m \cdot K} \quad [A4.21]$$

4.1.9.5.-Resultado del coeficiente global de transferencia de calor

Con todos los parámetros anteriores se obtiene un valor del coeficiente global de la ecuación A4.14 en función del área de transferencia. Combinamos este resultado con el que calculamos antes de $U \cdot A_{transf}$ y aplicamos un proceso iterativo para obtener el valor de área de transferencia. Para este fin se emplea la herramienta *Solver* de la hoja de cálculos de Excel. Se considera celda objetivo el valor resultante de la diferencia entre las dos ecuaciones de $U \cdot A_{transf}$ que debe igualarse a 0 y celda ajustable el área. Aplicando estos parámetros se obtiene:

$A_{transf}[m^2]$	434,33
$h_o[W/m^2K]$	3360,56
$1/U_o[m^2K/W]$	2,12E-03
$U \cdot A_{transf}[W/K]$	204520,549
$U[W/m^2K]$	387,052

4.1.10.-Longitud de los tubos y proceso de iteración

A partir de este momento se puede calcular la longitud de los tubos a partir del área de transferencia y el número de estos. Así, es posible comprobar la concordancia entre la longitud de los tubos calculada y la real que es el valor estándar elegido (22ft). De manera general, es la longitud calculada es menor que la estándar, se repetirá el proceso con un número de tubos inferior, o viceversa. El proceso de iteración terminará cuando se determine un número de tubos estándar que dé lugar a la longitud de los tubos de mayor proximidad e inferior al real.

Por lo tanto, la longitud de los tubos viene dada por la siguiente ecuación:

$$L_t = \frac{A_{transf}}{n_t \pi d_o} \quad [A4.22]$$

Operando se obtiene el siguiente resultado:

$L_{t \text{ por paso}}[m]$	6,43
-----------------------------	------

El valor de la longitud del tubo es muy próximo al valor estándar por lo tanto no es necesario probar con un número menor de tubos en este caso.

Finalmente, hay que recalcular el área de transferencia ya que la longitud del tubo estándar es ligeramente superior. Esto a su vez afecta al coeficiente global de transmisión de calor en su término de resistencia a la convección externa, debido a la dependencia de dicho término con el área. Teniendo en cuenta estos hechos, se presenta un resumen de los valores principales definitivos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$A_{\text{transf}}[\text{m}^2]$	434,33
$n_{\text{t inicial}}$	282
$D_o[\text{m}]$	0,01905
$L_t[\text{m}]$	25,73
$L_{\text{t por paso}}[\text{m}]$	6,43
$n_{\text{t final}}$	270,39
$L_{\text{tcalc}}[\text{m}]$	26,84
$A_{\text{transf recalculado}}[\text{m}^2]$	452,97
$U_{\text{recalc}}[\text{W/m}^2\text{K}]$	371,12

4.1.11.-Dimensiones de la carcasa

El calderín se caracteriza por tener un diámetro interior de carcasa inferior donde se albergan los tubos y el líquido del lado de la carcasa (D_{cinf}), y uno superior que permite la separación del vapor en equilibrio con el fondo (D_{csup}).

El primero se determina a partir de la **Tabla A8.19 del anexo 8**, una vez conocido el número de tubos. En este caso el valor es:

$D_{\text{cinf}}[\text{in}]$	39
$D_{\text{cinf}}[\text{m}]$	0,99

El diámetro superior es aproximadamente un 60% del inferior. Se calcula de una forma más precisa a partir de la siguiente ecuación:

$$D_{\text{csup}} = 2,93 \cdot h_w^{0,788} \quad [\text{A4.23}]$$

Donde h_w es la altura de la barrera, la cual mide 4 in más que el diámetro de la carcasa inferior, por lo tanto:

$D_{\text{csup}}[\text{in}]$	64,35
$D_{\text{csup}}[\text{m}]$	1,63

4.1.12.-Diseño mecánico

En este apartado se determina, en primer lugar, el espesor de los tubos, posteriormente el de la carcasa y, finalmente, es espesor del material aislante que recubre el equipo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.1.12.1.-Espesor de los tubos

De acuerdo con el código ASME B31.3, el espesor de los tubos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$t = \left(\frac{P_d d_o}{2(\sigma E + P_d Y)} + C \right) \frac{1}{1 - \left(\frac{M}{100} \right)} \quad [A4.24]$$

Donde:

- P_d es la presión de diseño (psi) en los tubos. Se calcula con la presión máxima de operación más el 10%.

$P_{oper} [Pa]$	1426000
$P_d [Pa]$	1568600
$P_d [psi]$	227,506

- d_o es el diámetro exterior del tubo (m)

$D_o [in]$	0,75
------------	------

- T_d es la temperatura de diseño. Se toma el mayor valor de temperatura y se le añaden 20°C.

$T_d [°C]$	380
$T_d [°F]$	716

- σ es la tensión máxima admisible (psi).

Se recoge en tablas de materiales del Código ASME y depende de la temperatura de diseño. Para el acero SA-106B a una temperatura de hasta 750 °F se tiene que la tensión es igual a: (véase la **tabla A8.5 del anexo 8**).

$\sigma (psi)$	15700
----------------	-------

- E es el coeficiente de soldadura

Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por lo tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es: (véase **tabla A8.7 del anexo 8**).

E	0,85
---	------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- C es el desgaste a la corrosión. Se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria y nuestro diseño se realiza para un período de 20 años:

C[in]	0,1
C[mm]	2,54

- Factor Y. Depende de la temperatura de diseño y del material de los tubos. Su valor se recoge en la **tabla A7.13 del anexo 7**. Para un acero al carbono el valor es de:

Y	0,4
---	-----

- M es la tolerancia de fabricación: La tolerancia en el espesor de la pared es de 12,5%.

Sustituyendo todos los valores en la ecuación anterior se tiene:

t[in]	0,106
-------	-------

El espesor normalizado inmediatamente mayor es el de:

t[in] _{normalizado}	0,109
t[mm] _{normalizado}	2,76
BWG	12

4.1.12.2.-Espesor de la carcasa

Para el cálculo del espesor requerido se ha considerado como controlantes los esfuerzos incluidos por la carga de presión interna. Se indica que tanto la carcasa superior como la inferior dispondrán del mismo espesor, por lo tanto se realizarán los cálculos considerando la situación más desfavorable, el diámetro de la carcasa superior.

Según el código ASME VIII Div. 1 para equipos a presión es necesario calcular el espesor de la envolvente cilíndrica dependiendo tanto de la tensión circunferencial como de la longitudinal que se produce en estos. Posteriormente se tomará en consideración el mayor de los espesores obtenidos en el procedimiento.

Estas tensiones se calculan a raíz de las siguientes ecuaciones:

— Tensión circunferencial:

$$t_{circ} = \frac{P_d R}{\sigma E - 0,6 P_d} \quad [A4.25]$$

— Tensión longitudinal:

$$t_{long} = \frac{P_d R}{2\sigma E + 0,4 P_d} \quad [A4.26]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde:

- P_d es la presión de diseño (psi) para toda la columna. Se toma la misma que la calculada para el sistema de tubos.

$P_{oper}[Pa]$	1426000
$P_d[Pa]$	1568600
$P_d[psi]$	227,506

- R es el radio de la columna.

R[m]	0,817
R[in]	32,175

- T_d es la temperatura de diseño. Se toma el mayor valor de temperatura de operación y se le añaden 20°C.

$T_d[°C]$	380
$T_d[°F]$	716

- σ es la tensión máxima admisible (psi). Se recoge en tablas de materiales del Código ASME y depende de la temperatura de diseño. Para acero SA-285 C a una temperatura de hasta 750°F se tiene que la tensión es igual a: (véase la **tabla A8.3 de anexo 8**).

$\sigma(psi)$	14300
---------------	-------

- E es el coeficiente de soldadura.

Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por lo tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es: (véase la **tabla A8.7 del anexo 8**).

E	0,85
---	------

- C es el desgaste a la corrosión.

Se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria para este tipo de recipientes con un funcionamiento máximo de 20 años.

$$C = 0,005 \text{ in} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 2,54 \text{ mm}$$

Finalmente se sustituyen los valores, se selecciona el mayor de ellos y se suma el desgaste por corrosión.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Las tensiones calculadas son:

$t_{\text{circ}}[\text{in}]$	0,609
$t_{\text{long}}[\text{in}]$	0,300
$t_{\text{final}}[\text{in}]$	0,709

El espesor máximo necesario es 0,609 in al que se le suma la corrosión obteniéndose un valor de espesor de 0,709 in.

Se comprueba si el espesor hallado es mayor que el espesor determinado por norma:

— Exigido por el código ASME:

$$t_{\text{min}}(\text{mm}) = 2,50 + C = 2,50 + 2,16 = 4,66 \text{ mm} = 0,18 \text{ in}$$

— Según la fórmula para aceros inoxidables:

$$t_{\text{min}}(\text{mm}) = 3 \text{ mm} = 0,118 \text{ in}$$

Por lo tanto el espesor mínimo para la envolvente será el exigido por la tensión circunferencial que soporta el recipiente.

Se toma como espesor el comercial inmediatamente superior a 0,709 in, que, según la **tabla A8.20 del anexo 8**, es:

$t_{\text{carc.comer}}[\text{in}]$	0,75
------------------------------------	------

4.1.12.3.-Espesor del aislante

El termoaislante elegido para cubrir el calderín es lana de roca, ya que cubre las necesidades técnicas del equipo.

Para una temperatura máxima de operación en la carcasa de hasta 450°C, se necesita un espesor de calorifugado de 120mm. (Véase la **tabla A8.14 del anexo 8**).

4.1.13.-Pérdidas de carga

En este apartado se procede a calcular las pérdidas de carga del fluido que pasa tanto por la carcasa como por los tubos.

4.1.13.1.-Pérdida de carga en el interior de los tubos

Para estimar la pérdida de carga del fluido por el interior de los tubos se utiliza la ecuación de Fanning:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$\Delta P = \frac{fG^2L}{d_i\rho} \quad [A4.27]$$

Donde:

- f es el factor de fricción
- G es la velocidad másica del fluido que circula por los tubos.
- L es la longitud de los tubos
- d_i es el diámetro interno de los tubos
- ρ_{fc} es la densidad del fluido calefactor que circula por el interior de los tubos

El primer paso es realizar el cálculo de la velocidad másica G, ya que es necesaria para la ecuación y para el cálculo del factor de fricción f.

$$G = \frac{4W_{fc}}{\pi d_i^2 N_t} \quad [A4.28]$$

En segundo lugar, debemos determinar el número de Reynolds para poder hallar el factor de fricción:

$$Re = \frac{D_i G}{\mu} \quad [A4.29]$$

A partir del diámetro interno 0,016 m se obtiene una rugosidad relativa para aceros comerciales igual a 0,0018, según las **figura A8.2 del anexo 8**.

En función del valor del Reynolds y la rugosidad relativa, mediante la gráfica de Moody (**Figura A8.1 del anexo 8**), se obtiene un valor de factor de fricción igual a 0,025.

Finalmente sustituimos en la ecuación anterior para obtener el valor de la pérdida de carga:

L _{tubos} [m]	6,71	G[kg/m ² s]	1342,839
D _i [m]	1,63E-02	Viscosidad (μ _{fc})[Pa·s]	3,33E-04
Densidad (ρ _{fc})[kg/m ³]	773	Re[adim]	65553,134
W _{fc} [kg/s]	78,594	Rugosidad relativa ε	0,0018
n _{tubos}	282	Factor fricción f	0,025
ΔP[kg/ms ²]	24072,287	ΔP[bar]	0,239

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.1.13.2.-Pérdida de carga en la carcasa

En el caso del cálculo de las pérdidas de carga por el lado de la carcasa se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta P = \frac{f G_c^2 (N_{def} + 1) d_c}{d_{eq} \rho} \quad [A4.30]$$

Donde:

- f es el factor de fricción
- G_c es la velocidad másica del fluido que circula por la carcasa
- d_c es el diámetro de la carcasa
- ρ es la densidad media del fluido que circula por la carcasa
- N_{def} es el número de deflectores
- D_{eq} es el diámetro equivalente, que se calculará posteriormente.

De nuevo, el primer paso es realizar el cálculo de la velocidad másica G, ya que es necesaria para la ecuación y para el cálculo del factor de fricción f.

$$G = \frac{4 \cdot L'}{\pi (D_c^2 - N_t d_o^2) X} \quad [A4.31]$$

Siendo:

- X el cociente entre el Pitch y el diámetro exterior de los tubos:

X[adim]	1,333
---------	-------

Por lo tanto, la ecuación de la velocidad másica en la carcasa es:

D _c [m]	1,634
Pitch[jn]	1
D _o [m]	0,01905
X[adim]	1,333
L'[kg/s]	10,769
G _c [kg/m ² s]	4,003

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En segundo lugar, se determina el número de Reynolds para poder hallar el factor de fricción:

$$Re = \frac{D_c G_c}{\mu} \quad [A4.32]$$

$G_c[\text{kg/m}^2\text{s}]$	4,003
Viscosidad (μ_{ff})[Pa·s]	1,80E-04
Re[adim]	3,63E+04

Para una rugosidad relativa igual a 0,00003 el factor de fricción toma un valor de 0,023 en la gráfica de Moody.

Por último se realiza el cálculo del diámetro equivalente, que se calcula mediante la relación:

$$D_e = 4 \cdot \frac{\left(4 \frac{P'^2}{3} \right) - \left(\pi \frac{d_o^2}{8} \right)}{\pi \frac{d_o}{2}} \quad [A4.33]$$

Finalmente se sustituye en la ecuación A4.31 para conocer la pérdida de carga final:

$D_e[\text{m}]$	0,096
$\Delta P[\text{kg/ms}^2]$	0,01096
$\Delta P[\text{bar}]$	1,096E-07

Se suman por último las dos pérdidas de carga calculadas para el exterior e interior de los tubos con el fin de obtener la pérdida total de presión que tenemos en el equipo de intercambio de calor:

$\Delta P_{\text{total}}[\text{bar}]$	0,239
---------------------------------------	-------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.2.-Diseño del intercambiador de calor líquido-líquido ICA

4.2.1.-Introducción

Se diseña un intercambiador de calor para calentar la alimentación que llega a la torre. Tal y como se justifica en la memoria descriptiva, se selecciona un equipo de intercambio de calor del tipo carcasa y tubos.

A continuación se indican los pasos básicos que se llevan a cabo tanto en el dimensionamiento como en el diseño mecánico del intercambiador.

4.2.2.-Caracterización de las corrientes de entrada

La corriente llega al intercambiador de calor procedente de la unidad de proceso anterior a una temperatura de 20°C. Esta sale a la temperatura deseada de entrada a la columna, 130°C, utilizando THERMINOL 66 como aceite calefactor.

El fluido frío es la corriente de alimentación y se caracteriza por las siguientes propiedades:

Fluido frío	
Viscosidad media(μ_{ff})[cP]	0,2723
Densidad media(ρ_{ff})[kg/m ³]	721,2
Temperatura de entrada($T_{f,o}$)[°C]	20
Temperatura de salida($T_{f,L}$)[°C]	130
Temperatura media($T_{f,m}$)[°C]	75
Conductividad térmica(K)[W/mK]	0,07194

En cuanto al fluido calefactor utilizado se presentan las siguientes propiedades:

Fluido calefactor	
Viscosidad media(μ_{fc})[cP]	0,34
Densidad media(ρ_{fc})[kg/m ³]	777
Temperatura de entrada($T_{c,o}$)[°C]	350
Temperatura de salida($T_{c,L}$)[°C]	325
Temperatura media($T_{f,m}$)[°C]	337,5
Calor de vaporización(λ)[kJ/kg]	276
Capacidad calorífica(C_p)[kJ/kgK]	2,72
Conductividad térmica(K)[W/mK]	0,0896

Los datos del fluido frío se han tomado del HYSYS al realizar la simulación de la línea de proceso y realizando la media entre los distintos valores de las corrientes. Los del fluido

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

caliente, a partir de la hoja de especificaciones del Therminol 66 con la temperatura media entre las corrientes de entrada y salida que, basándose en la experiencia para este tipo de calefactor es conveniente un salto térmico entre los 20 y 30 °C.

4.2.3.-Selección del tipo de intercambiador

El intercambiador que se elige como equipo auxiliar de acondicionamiento de la torre de rectificación es de tipo carcasa y tubos con cabezal flotante interno (Tipo AES según las normas TEMA), tal y como se desarrolla en la memoria descriptiva del presente proyecto.

4.2.4.-Asignación de flujos

Se ha designado que la corriente de alimentación a la columna circula por el interior de los tubos ya que tiene una mayor presión que el fluido calefactor. Por lo tanto, el aceite térmico circula por la carcasa del equipo.

4.2.5.-Cálculo del calor intercambiado

El balance de energía al intercambiador es el siguiente:

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad [A4.31]$$

Donde:

- Q es el calor intercambiado entre los fluidos
- \dot{m} es el caudal másico de los diferentes flujos:
- W_{fc} : caudal másico del fluido caliente en kg/h
- F_o : caudal másico de la alimentación
- C_p es el calor específico para cada fluido en kJ/kgK
- ΔT es la diferencia que experimenta cada corriente en grados K o °C.

Si se realiza el balance de energía al fluido frío obtendremos los siguientes valores para el calor intercambiado:

$Q_{int}[kJ/h]$	1,52E+07
$W_{alim}[kg/h]$	52450
$(C_p)[kJ/kgK]$	2,639
$\Delta T[°C]$	110

4.2.6.-Características de los tubos y material empleado

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Se eligen tubos de calibre BWG 12 con un diámetro exterior igual a 0,75 in y un interno de 0,69 in. Esta decisión será demostrada más adelante en la sección del cálculo del espesor de tubos.

La configuración es triangular de una pulgada de Pitch. El material empleado es acero al carbono SA-185 C para la carcasa y SA-106B para los tubos.

4.2.7.-Diferencia de temperatura media logarítmica

Esta variable refleja la diferencia media de la temperatura entre las corrientes fría y caliente a lo largo del intercambiador. Para flujo en contracorriente, la expresión que determina su valor es la siguiente:

$$LMTD = \frac{(T_{c,L} - T_{f,L}) - (T_{c,o} - T_{f,o})}{\ln \frac{(T_{c,L} - T_{f,L})}{(T_{c,o} - T_{f,o})}} \quad [A4.32]$$

Sustituyendo los valores de temperatura de los fluidos en la ecuación obtenemos:

$T_{c,L} [^{\circ}\text{C}]$	325
$T_{f,L} [^{\circ}\text{C}]$	130
$T_{c,o} [^{\circ}\text{C}]$	350
$T_{f,o} [^{\circ}\text{C}]$	20
LMTD [$^{\circ}\text{C}$]	256,61

La LMTD ha sido calculada para una disposición de flujo en contracorriente pura. Sin embargo, el diseño es de un intercambiador con un paso por carcasa y dos pasos por tubos, que se caracteriza por un flujo correspondiente a una mezcla de contracorriente y corrientes paralelas. Por tal motivo, es necesario el cálculo del término F, de manera que corrija la desviación de LMTD. Los valores se representan en la siguiente figura, en función de las variables P y R, dadas por las fórmulas siguientes:

$$P = \frac{T_{c,L} - T_{c,o}}{T_{f,o} - T_{c,o}} \quad [A4.33]$$

$$R = \frac{T_{f,o} - T_{f,L}}{T_{c,L} - T_{c,o}} \quad [A4.34]$$

Con estos datos y recurriendo a la figura 3 del presente anexo, se tiene que el factor de corrección es de:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

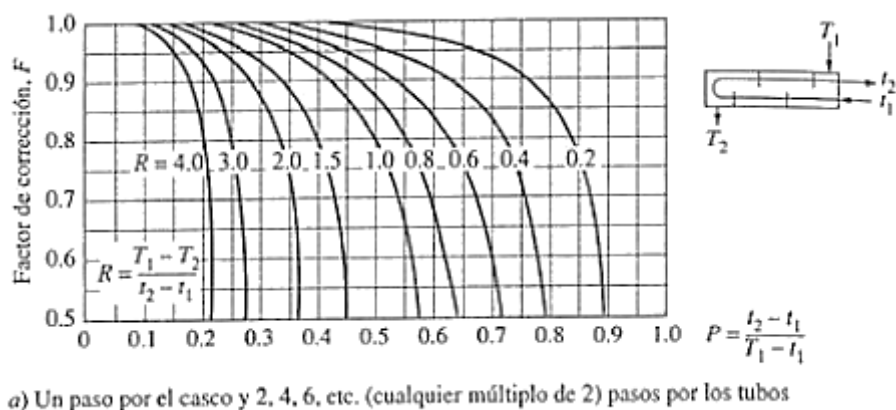


Figura 3.- Gráfica para determinar el factor de corrección intercambiador (ICA)

P	0,0758
R	4,4
F	1

Por lo tanto la diferencia de la temperatura media logarítmica queda:

$\Delta T_m [^{\circ}\text{C}]$	256,61
---------------------------------	--------

Una vez que se dispone de este valor, se obtiene el producto de $U \cdot A_{\text{transf}}$:

$U \cdot A_{\text{transf}} [\text{W/K}]$	16481,772
--	-----------

4.2.8.-Suposición del número de tubos del intercambiador

A partir de este punto se sigue la siguiente estrategia: se supone un número de tubos (n_t) y, a partir de este, se obtiene el coeficiente global de transferencia (U). Conocido este y el producto $U \cdot A_{\text{transf}}$, se determina el área total de transferencia y, por lo tanto, la longitud de los tubos. Finalmente, se comprueba la concordancia entre la longitud calculada (L_{calc}) y la real, que ha sido seleccionada previamente. Si los valores de las longitudes no coinciden, hay que realizar iteraciones cambiando el número de tubos hasta obtener los valores finales.

Así, en primer lugar, hay que partir de un número de tubos arbitrario que se calcula relacionando el caudal másico total de alimentación y el que puede ir por un tubo.

Antes se selecciona una supuesta velocidad del líquido en la tubería. Teniendo en cuenta las recomendaciones de la bibliografía, la velocidad para agua y líquidos similares en los tubos suele estar comprendida entre 0,9 y 2,4 m/s. Como el fluido es bastante viscoso se selecciona una velocidad inicial baja igual a 1,5 m/s.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Así mismo, el caudal másico por tubo corresponde a la siguiente ecuación:

$$F_{otubo} = \rho_F v_o A_{it} \quad [A4.35]$$

Por tanto el número de tubos se conoce empleando la siguiente ecuación:

$$n_t = \frac{F_o}{F_{otubo}} \quad [A4.36]$$

Aplicando este procedimiento se obtienen los siguientes resultados:

$W_{alim} [kg/h]$	5,25E+04
$W_{alim\ tubo} [kg/s]$	0,225
$W_{alim\ tubo} [kg/h]$	8,08E+02
Densidad (ρ_{fc}) [kg/m^3]	777
v_o supuesta [m/s]	1,5
v_o calculada [m/s]	1,31
$A_{it} [m^2]$	2,08E-04
n_t calculado	64,89
n_t calc	65
$W_{alim\ tubo\ recalc} [kg/h]$	7,60E+02
$W_{alim\ tubo\ recalc} [kg/s]$	0,211

Los intercambiadores de carcasa y tubos comerciales no se construyen para cualquier número de tubos, sino con el estandarizado. Estos valores se ilustran en la **tabla A8.19 del anexo 8**.

Se selecciona una columna de tubos con 0,75 in de diámetro, 1 in de Pitch y 2 pasos. Es necesario multiplicar este número por dos para tener en cuenta los 2 pasos por tubo. El número de tubos inmediatamente superior es 138, lo que significa que se tienen 69 tubos.

4.2.9.-Coeficiente global de intercambio de calor

Al igual que en el estudio del calderín se encuentran las mismas resistencias para hallar el valor de este coeficiente. En resumen, se utiliza la misma ecuación desarrollada con anterioridad en este anexo.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i D_i} + R_{s,i} \frac{D_o}{D_i} + \frac{D_o \ln(r_o/r_i)}{2K_m} + R_{s,o} + \frac{1}{h_o} \quad [A4.37]$$

Por lo tanto, para estimar el coeficiente global de transferencia de materia es imprescindible calcular cada uno de los coeficientes individuales.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.2.9.1.-Coeficiente de película interna (h_i)

El cálculo del coeficiente se realiza despejándolo a partir de la definición del número de Nusselt (Nu).

$$Nu = \frac{h_i D_i}{k} \quad [A4.38]$$

A su vez el número de Nusselt se puede obtener a partir de una serie de correlaciones que desarrollan la convección para flujo interno en tubos circulares. La elección de la ecuación apropiada depende del valor del número de Reynolds y del Prandtl, por lo tanto el primer paso es realizar el cálculo de estos:

El número de Reynolds (Re) para un banco de tubos es:

$$Re = \frac{4F_o}{\mu \pi D_i N_t} \quad [A4.39]$$

El número de Prandtl es un número adimensional igual a:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad [A4.40]$$

Se procede ahora a elegir la correlación más adecuada. Se selecciona la siguiente expresión donde el número de Prandtl debe situarse entre 0,6 y 160 y el Reynolds ser mayor que 10000, al igual que el diseño del calderín.

$$Nu = 0,023(Re)^{4/5} Pr^{0,4} \quad [A4.41]$$

Y por último, determinaremos el valor del coeficiente de película interna:

$W_{alim}[\text{kg/s}]$	14,569
$Re[\text{adim}]$	60735,511
$Pr[\text{adim}]$	9,989
$Nu[\text{adim}]$	387,515
$h_i[\text{W/m}^2\text{K}]$	1714,926

4.2.9.2.-Coeficiente de película externa (h_o)

El cálculo del coeficiente se realiza despejándolo a partir de la definición del número de Nusselt (Nu).

$$Nu = \frac{h_o D_o}{k} \quad [A4.42]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

En el caso del flujo por el exterior de un banco de tubos hay que tener en cuenta que el patrón de flujo y el nivel de turbulencia corriente abajo varía, y por tanto, la transferencia de calor hacia o desde ellos también lo hacen. En consecuencia, se deben considerar a la vez todos los tubos del haz.

La disposición de los tubos en este intercambiador de calor es escalonada y el valor del paso transversal (S_t) es igual al Pitch (1 in).

En los bancos de tubos las características del flujo son dominadas por la velocidad máxima que se tiene dentro del banco. Por lo tanto, el número de Reynolds se define sobre la velocidad máxima.

$$Re_D = \frac{\rho v_{max} D}{\mu} \quad [A4.43]$$

Esta velocidad máxima se tiene en el área mínima de flujo entre los tubos y se calcula de la siguiente manera:

$$v_{max} = \left(\frac{S_t}{2(S_t - D)} \right) v \quad [A4.44]$$

La velocidad del flujo de la alimentación se calcula a partir de la velocidad másica:

$$v = \frac{G_F}{\rho} \quad [A4.45]$$

Ésta a su vez se calcula mediante la ecuación propuesta:

$$G_F = \frac{4W_{fc}}{\pi(D_c^2 - N_t d_o^2) X} \quad [A4.46]$$

En la tabla que se expone a continuación se exponen los resultados obtenidos:

$W_{fc}[\text{kg/s}]$	62,20
$X[\text{adim}]$	1,33
$v[\text{m/s}]$	0,82
$S_t[\text{m}]$	0,03
$v_{max}[\text{m/s}]$	1,63
$G_F[\text{kg/m}^2\text{s}]$	633,53
$Re[\text{adim}]$	70992,62
$Pr[\text{adim}]$	10,32

A su vez, el número de Nusselt se puede obtener a partir de una serie de correlaciones que desarrollan la convección para flujo externo en banco de tubos. La elección de la ecuación apropiada depende del valor del número de Reynolds y del Prandtl. Para el uso de la siguiente ecuación el Prandtl debe ser mayor de 0,7 y el Reynolds ser mayor que 2000 y menor que $8 \cdot 10^4$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$Nu = 1,13C(Re_D)^m Pr^{1/3} \quad [A4.47]$$

Donde C y m son constante que se obtiene interpolando a partir de la siguiente tabla.

S_F/D	S_F/D							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
S_F/D	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m
Alineado								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Escalonado								
0.600	—	—	—	—	—	—	0.213	0.636
0.900	—	—	—	—	0.446	0.571	0.401	0.581
1.000	—	—	0.497	0.538	—	—	—	—
1.125	—	—	—	—	0.478	0.565	0.518	0.560
1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

Tabla 1.-Constantes de las ecuaciones para flujo sobre banco de tubos

Así se halla el número de Nusselt y podemos determinar finalmente el valor del coeficiente de película interna:

Nu[adim]	444,830
$h_o[W/m^2K]$	2092,220
$C_p[J/kgK]$	2720
$K[W/mK]$	0,0896

4.2.9.3.-Factores de ensuciamiento interno ($R_{s,i}$) y externo ($R_{s,o}$).

El ensuciamiento en los tubos tanto interior como exteriormente reduce la cantidad de calor transmitida. Estas resistencias se toman de las tablas de las normas TEMA, que gracias a la experiencia industrial, establecen los valores de $R_{s,i}$ y $R_{s,o}$ para una amplia gama de productos industriales. A continuación se muestran las resistencias de ensuciamiento en ($h \cdot ft^2 \circ F/Btu$) de las sustancias de interés.

Se considera como fluido similar al aceite térmico el “quench oil” que es el aceite con mayor resistencia de ensuciamiento.

$R_{s,i}[m^2K/W]$	7,04E-04
$R_{s,o}[m^2K/W]$	9,00E-04

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.2.9.4.-Conductividad térmica del material (K_m)

La conductividad térmica para el acero al carbono SA-106 se toma de la bibliografía a una temperatura máxima de las corrientes.

K_m [W/mK]	32,73
--------------	-------

4.2.9.5.-Resultado del coeficiente global de transferencia de calor

Con todos los parámetros calculados podemos sustituir para obtener el valor del coeficiente global:

$1/U_o$ [m ² K/W]	2,93E-03
U [W/m ² K]	341,011
$U \cdot A_{transf}$ [W/K]	16481,772
A_{transf} [m ²]	48,332

4.2.10.-Longitud de los tubos y proceso de iteración

Ahora podemos calcular la longitud de los tubos a partir del área de transferencia y el número de tubos. Así, es posible comprobar la concordancia entre la longitud de los tubos calculada y la real que es el valor estándar elegido (19 ft). De manera general, si la longitud calculada es menor que la estándar, se repetirá el proceso con un número de tubos inferior, o viceversa. El proceso de iteración terminará cuando se determine un número de tubos estándar que dé lugar a la longitud de tubos de mayor proximidad e inferior a la real.

$$A_{transf} = \frac{U_o A_{transf}}{U_o} \quad [A4.48]$$

Por lo tanto, la longitud de los tubos viene dada por la siguiente fórmula:

$$L_t = \frac{A_{transf}}{n_t \pi d_o} \quad [A4.49]$$

El valor de la longitud del tubo es muy próximo a la estándar por lo tanto no es necesario probar con un número menor de tubos.

A_{transf} [m ²]	48,33
$n_{t \text{ supuesto}}$	69
D_o [m]	0,01905
L_t [m]	11,70
$L_t \text{ por paso}$ [m]	5,85

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Finalmente, hay que recalculer el área de transferencia ya que la longitud del tubo estándar es ligeramente superior. Esto a su vez afecta al coeficiente global de transmisión de calor en su término de resistencia a la convección externa, debido a la dependencia de dicho término con el área. Teniendo en cuenta estos hechos, se presenta una tabla resumen de los valores principales definitivos:

$n_{t\text{ final}}$	69,02
$L_{\text{tcalc}}[\text{m}]$	11,7
$A_{\text{transf recalcl}}[\text{m}_2]$	48,315
$U_{\text{recalcl}}[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	341,134

4.2.11.-Dimensiones de la carcasa

El diámetro interior de carcasa inferior donde se albergan los tubos se determina a partir de la **tabla A8.19 del anexo 8**, una vez conocido el número de tubos:

$D_{\text{cinf}}[\text{in}]$	15,25
$D_{\text{cinf}}[\text{cm}]$	38,735

4.2.12.-Deflectores

El número de deflectores que irán provistos en la carcasa se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$N_c = \frac{L}{P_{\text{def}}} \quad [\text{A4.50}]$$

Donde P_{def} es el valor medio entre la distancia máxima y mínima entre deflectores. La separación mínima ($P_{\text{def min}}$) es el mayor de estos valores:

- 1/5 del diámetro inferior de la carcasa
- 2 in

En este caso se toma el valor de un quinto el diámetro inferior:

$P_{\text{defmin}}[\text{in}]$	3,05
$P_{\text{defmin}}[\text{m}]$	0,07747

Para la separación máxima ($P_{\text{def max}}$) haremos uso de la tabla que se muestra a continuación:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits ° F (° C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

Tabla2.-Separación máxima entre placas deflectoras(Normas TEMA)

En función del diámetro exterior de los tubos y el material de estos, el espaciamiento máximo entre placas es de:

$P_{def\ max}[in]$	60
$P_{def\ max}[m]$	1,524

Por lo tanto, se considera como espaciamiento entre los deflectores el número entero más próximo a la media de los calculados, así el número de deflectores es:

$P_{def}[m]$	0,80
$N_{c\ calc}$	7,3
N_c	8

El espesor para un diámetro de carcasa de 15,25 in y un espaciamiento entre deflectores de 31,5 in, según recoge la siguiente tabla es de 0,25 in.

Nominal Shell ID	Plate Thickness					
	Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.					
	12 (305) and Under	Over 12 (305) to 24 (610) Inclusive	Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive	Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive	Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive	Over 60 (1524)
6 - 14 (152-356)	1/16 (1.6)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)
15 - 28 (381-711)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)
29 - 38 (737-965)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	5/16 (7.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)
39 - 60 (991-1524)	1/4 (6.4)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)
61 - 100 (1549-2540)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)

Tabla 3.-Espesor de los deflectores (Normas TEMA)

Los deflectores segmentados, como es el caso de estos, tienen una altura del 25% del diámetro del intercambiador, por lo tanto:

$H_{def}[cm]$	9,68
---------------	------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.2.13.-Diseño mecánico

En este apartado se determina, en primer lugar, el espesor de los tubos, posteriormente, el de la carcasa y, finalmente, es espesor del material aislante que recubre el equipo.

4.2.13.1.-Espesor de los tubos

De acuerdo con el código ASME B31.3, el espesor de los tubos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$t = \left(\frac{P_d d_o}{2(\sigma E + P_d Y)} + C \right) \frac{1}{1 - (M/100)} \quad [A4.51]$$

Donde:

- P_d es la presión de diseño (psi) en los tubos. Se calcula con la presión máxima de operación más el 10%.

$P_{oper}[Pa]$	1426000
$P_d[Pa]$	1568600
$P_d[psi]$	227,506

- d_o es el diámetro exterior del tubo:

$D_o[in]$	0,75
-----------	------

- T_d es la temperatura de diseño. Se toma el mayor valor de temperatura y se le añaden 20°C.

$T_d[°C]$	370
$T_d[°F]$	698

- σ es la tensión máxima admisible (psi). Se recoge en las tablas de materiales del Código ASME y depende de la temperatura de diseño. Para acero inoxidable SA-106 B a una temperatura de hasta 700°F se tiene que la tensión es igual a: (véase la **tabla A8.5 del anexo**).

$\sigma(psi)$	14800
---------------	-------

- E es el coeficiente de soldadura

Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por lo tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es: (véase **tabla A8.7 del anexo 8**).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

E	0,85
---	------

- C es el desgaste a la corrosión. Se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria para este tipo de recipientes con un funcionamiento máximo de 20 años.

$$C = 0,005 \text{ in} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 2,54 \text{ mm}$$

- Factor Y

Depende de la temperatura de diseño y del material de los tubos. Su valor se recoge en la **tabla A8.8 del anexo 8**. Para un acero al carbono el valor es de:

Y	0,4
---	-----

- M es la tolerancia de fabricación.

La tolerancia en el espesor de la pared es del 12,5 %.

Sustituyendo todos estos valores obtendremos el valor del espesor, sin embargo seleccionaremos para nuestro diseño es espesor normalizado inmediatamente superior al que hemos calculado.

t[in]	0,107
t[in] _{normalizado}	0,109
t[mm] _{normalizado}	2,76
BWG	12

4.2.13.2.-Espesor de la carcasa

Para el cálculo del espesor de carcasa requerido se ha considerado como controlantes los esfuerzos inducidos por la carga de presión interna. Se indica que tanto la carcasa superior como la inferior dispondrán del mismo espesor, por lo tanto se realizarán los cálculos considerando la situación más desfavorable, el diámetro de la carcasa superior.

Según el código ASME VIII División 1 para equipos a presión es necesario calcular el espesor de la envolvente cilíndrica dependiendo tanto de la tensión circunferencial como de la longitudinal que se produce en estos. Posteriormente se tomará en consideración el mayor de los espesores obtenidos en el procedimiento. Estas tensiones se calculan a raíz de las siguientes ecuaciones:

— Tensión circunferencial:

$$t_{circ} = \frac{P_d R}{\sigma E - 0,6 P_d} \quad [\text{A4.52}]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

— Tensión longitudinal:

$$t_{long} = \frac{P_d R}{2\sigma E + 0,4P_d} \quad [A4.53]$$

Donde:

- P_d es la presión de diseño (psi) para toda la columna. Se toma la misma que la calculada para el sistema de tubos.

P_d [psi]	227,506
-------------	---------

- R es el radio de la columna

R [m]	0,320
R [in]	12,581

- T_d es la temperatura de diseño. Se toma el mayor valor de temperatura de operación y se le añaden 20°C.

T_d [°C]	370
T_d [°F]	698

- σ es la tensión máxima admisible (psi). Se recoge en tablas de materiales del Código ASME y depende de la temperatura de diseño. Para acero inoxidable SA-285C a una temperatura de hasta 700 °F se tiene que la tensión es igual a:(véase la **tabla A8.3 del anexo 8**).

σ (psi)	14300
----------------	-------

- E es el coeficiente de soldadura. Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por lo tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es de :(véase la **tabla A8.7 del anexo 8**).

E	0,85
-----	------

- C es el desgaste a la corrosión. Se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria para este tipo de recipientes con un funcionamiento máximo de 20 años.

$$C = 0,005 \text{ in} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 2,54 \text{ mm}$$

Finalmente se sustituyen los valores, se selecciona el mayor de ellos y se suma el desgaste por corrosión:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$t_{\text{circ}}[\text{in}]$	0,238
$t_{\text{long}}[\text{in}]$	0,117
$t_{\text{final}}[\text{in}]$	0,338

El espesor máximo necesario es 0,238 in al que se le suma la corrosión obteniéndose el valor del espesor 0,338.

Se comprueba si el espesor hallado es mayor que el espesor determinado por norma:

— Exigido por el código ASME VIII-1:

$$t_{\text{min}}(\text{mm}) = 2,50 + C = 2,50 + 2,16 = 4,66 \text{ mm} = 0,18 \text{ in}$$

— Según las fórmula para aceros inoxidables:

$$t_{\text{min}}(\text{mm}) = 3 \text{ mm} = 0,118 \text{ in}$$

Por lo tanto el espesor mínimo para la envolvente será 0,338 in.

Se toma como espesor el comercial inmediatamente superior a dicho valor, que según la **tabla A8.18 del anexo 8** es:

$t_{\text{carc comer}}[\text{in}]$	0,75
------------------------------------	------

4.2.13.3.-Espesor del aislante

El termoaislante elegido para cubrir el calderín es lana de roca, ya que cubre las necesidades técnicas del equipo. Para una temperatura máxima de operación de hasta 700 °F, se necesita un espesor de calorifugado de 120 mm.

4.2.14.-Pérdidas de carga

En este apartado se procede a calcular las pérdidas de carga del fluido que pasa tanto por carcasa como por los tubos.

4.2.14.1.-Pérdida de carga en el interior de los tubos

Para estimar la pérdida de carga que presenta el fluido por el interior de los tubos se utiliza la ecuación de Fanning:

$$\Delta P = \frac{f G^2 L}{d_i \rho} \quad [\text{A4.54}]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde:

·f es el factor de fricción

·G es la velocidad másica del fluido que circula por los tubos.

·L es la longitud de los tubos

· d_i es el diámetro interno de los tubos

· ρ_{fc} es la densidad del fluido calefactor que circula por el interior de los tubos

El primer paso es realizar el cálculo de la velocidad másica G, ya que es necesaria para la ecuación y para el cálculo del factor de fricción f.

$$G = \frac{4W_{fc}}{\pi d_i^2 N_t} \quad [A4.55]$$

En segundo lugar, debemos determinar el número de Reynolds para poder hallar el factor de fricción:

$$Re = \frac{D_i G}{\mu} \quad [A4.56]$$

A partir del diámetro interno 0,64 in se obtiene una rugosidad relativa para aceros comerciales igual a 0,0018, según las **figura A8.2 del anexo 8**.

En función del valor del Reynolds y la rugosidad relativa, mediante la gráfica de Moody (**Figura A8.1 del anexo 8**), se obtiene un valor de factor de fricción igual a 0,026.

Finalmente sustituimos en la ecuación anterior para obtener el valor de la pérdida de carga:

G[kg/m ² s]	1017,365
Re[adim]	60735,511
Rugosidad relativa ϵ	0,0018
Factor fricción f	0,026
ΔP [kg/ms ²]	13432,869
ΔP [bar]	0,134

4.2.13.2.-Pérdida de carga en la carcasa

En el caso del cálculo de las pérdidas de carga por el lado de la carcasa se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta P = \frac{f G_c^2 (N_{def} + 1) d_c}{d_{eq} \rho} \quad [A4.57]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde:

·f es el factor de fricción

·G_c es la velocidad másica del fluido que circula por la carcasa

·d_c es el diámetro de la carcasa

·ρ es la densidad media del fluido que circula por la carcasa

·N_{def} es el número de deflectores

·D_{eq} es el diámetro equivalente, que se calculará posteriormente.

De nuevo, el primer paso es realizar el cálculo de la velocidad másica G, ya que es necesaria para la ecuación y para el cálculo del factor de fricción f.

$$G = \frac{4 \cdot L'}{\pi (D_c^2 - N_d d_o^2) X} \quad [A4.58]$$

Siendo:

·X el cociente entre el Pitch y el diámetro exterior de los tubos:

X[adim]	1,33
---------	------

Por lo tanto, la ecuación de la velocidad másica en la carcasa es:

D _c [m]	0,639
L'(caudal másico fluido frío)[kg/s]	62,083
G _c [kg/m ² s]	154,613

En segundo lugar, se determina el número de Reynolds para poder hallar el factor de fricción:

$$Re = \frac{D_c G_c}{\mu} \quad [A4.59]$$

Para una rugosidad relativa igual a 0,00007 el factor de fricción toma un valor de 0,019 en la gráfica de Moody.

Por último se realiza el cálculo del diámetro equivalente, que se calcula mediante la relación:

$$D_e = 4 \cdot \left[\frac{\left(4 \frac{P'^2}{3} \right) - \left(\pi \frac{d_o^2}{8} \right)}{\pi \frac{d_o}{2}} \right] \quad [A4.60]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Finalmente se sustituye en la ecuación A4.58 para conocer la pérdida de carga final:

Re[adim]	2,91E+05
Rugosidad relativa ϵ	0,00007
Factor fricción f	0,019
Pitch[m]	0,0254
D_e [m]	0,096
ΔP [kg/ms ²]	35,048
ΔP [bar]	3,50E-04

Se suman por último las dos pérdidas de carga calculadas para el exterior e interior de los tubos con el fin de obtener la pérdida total de presión que tenemos en el equipo de intercambio de calor:

ΔP_{total} [bar]	0,134
--------------------------	-------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.3.-Diseño del condensador total

4.3.1.-Introducción

Se diseña un intercambiador de calor para condensar el vapor que sale por la cabeza de la torre. Tal y como se justifica en la Memoria Descriptiva, se selecciona un aerorefrigerador de tiro forzado.

A continuación se indican los pasos básicos que se llevan a cabo tanto en el dimensionamiento como en el diseño mecánico del condensador de la columna.

4.3.2.-Caracterización de las corrientes de entrada

Al condensador llega la corriente de vapor procedente del primer plato de la torre a 127,7°C con el objetivo de condensar la corriente que retorna a la zona superior de la columna. La corriente sale en estado líquido a 96,76 °C.

El fluido frío es aire que proviene del medio exterior y posee las siguientes propiedades:

Fluido frío	
Viscosidad media(μ_{ff})[Pa·s]	1,93E-05
Densidad media(ρ_{ff})[kg/m ³]	1,11
Temperatura de entrada($T_{f,o}$)[°C]	30
Temperatura de salida($T_{f,l}$)[°C]	86
Temperatura media($T_{f,m}$)[°C]	58
Capacidad calorífica($C_{p\text{ aire}}$)[kJ/kg/K]	1,008
Peso molecular($P_{m\text{ aire}}$)[kg/kmol]	28,84
Conductividad térmica(K)[W/mK]	0,027

La temperatura de entrada del aire es la media anual según las condiciones climáticas del entorno de la columna. La de salida se elige a partir de los datos que nos devuelve el simulador HYSYS.

El fluido a condensar presenta las siguientes propiedades:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Fluido calefactor	
Viscosidad del líquido($\mu_{f,c,L}$)[Pa·s]	9,04E-05
Densidad del líquido($\rho_{f,c,L}$)[kg/m ³]	475,6
Temperatura de entrada($T_{c,o}$)[°C]	127,7
Temperatura de salida($T_{c,L}$)[°C]	96,76
Temperatura media($T_{f,m}$)[°C]	112,23
Capacidad calorífica(Cp)[kJ/kmolK]	189,1
Capacidad calorífica(Cp)[kJ/kgK]	3,235
Conductividad térmica(K)[W/mK]	0,06619

Se reitera que todos los datos se han tomado del HYSYS al realizar la simulación de la línea de proceso y realizando la media entre los distintos valores de las corrientes.

4.3.3.-Selección del tipo de intercambiador

La selección de un intercambiador enfriado por aire frente a uno enfriado por agua es una cuestión económica o de requerimientos del proceso, hay quienes consideran gastos de enfriamiento del agua, potencia de los ventiladores y la temperatura de salida del fluido a refrigerar.

4.3.4.-Asignación de flujos

Como es lógico, para el caso de los aerorefrigeradores el líquido a condensar va por el interior de los tubos, ya que el medio refrigerante es el aire externo que circula impulsado por un ventilador.

4.3.5.-Cálculo del calor intercambiado

El calor intercambiado entre los fluidos se obtiene del simulador, y tiene un valor de:

Q_{int} [kJ/h]	4,71E+06
------------------	----------

4.3.6.-Características de los tubos y material empleado

Se eligen tubos de calibre BWG 12 con un diámetro exterior igual a 1 in y uno interno de 0,89 in .Esta decisión será demostrada más adelante en la sección del cálculo del espesor de tubos.

La configuración es triangular al tresbolillo de 2,5 in de Pitch. El material empleado para la construcción de los tubos es acero al carbono SA-285 C.

Cada tubo dispone de una extensión del área de transferencia a partir de aletas que serán adheridas a estos. Se seleccionan aletas de aluminio circulares.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

La altura de estas es de $\frac{1}{4}$ in (6,35 mm) y tienen un espesor de 0,014 in (0,36mm). Se distribuyen a lo largo del tubo con una densidad de 8 por in (315 aletas/m).

A su vez, a partir de estos datos, se pueden determinar otros de interés:

- ✓ Sección exterior de los tubos:

$$A_{otubos} = \pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \quad [A4.61]$$

- ✓ Sección interior de los tubos:

$$A_{itubos} = \pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \quad [A4.62]$$

- ✓ Espaciamiento entre aletas:

$$E_a = \frac{1 - (d_a \cdot e_a)}{d_a} \quad [A4.63]$$

- ✓ Longitud de la aleta:

$$L_a = \pi (D_o + 2h_a) \quad [A4.64]$$

- ✓ Área específica exterior de la superficie de tubo expuesta (A_{mo}):

$$A_{mo} = \pi D_o - \pi D_o e_a d_a \quad [A4.65]$$

- ✓ Área de una aleta (A_a):

$$A_a = \text{área del espesor} + \text{área de los extremos} = 2\pi \frac{(2h_a + D_o)^2 - D_o^2}{4} + \pi (2h_a + D_o) e_a \quad [A4.66]$$

- ✓ Área específica de la superficie de aletas (A_f):

$$A_f = A_a d_a \quad [A4.67]$$

- ✓ Área específica exterior de la superficie de tubo aleteado (A_o):

$$A_o = A_{mo} + A_f \quad [A4.68]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Área libre entre dos tubos aleteados ($A_{aire\ t}$):

$$A_{aire\ t} = \text{área libre entre zona desnuda de los tubos} + \text{área libre entre zona aleteada de los tubos} =$$

$$\frac{n^{\circ} \text{aletas}}{\text{tubo}} E_a (P' - D_o) + \frac{n^{\circ} \text{aletas}}{\text{tubo}} e_a [P' - (2h_a + D_o)]$$

[A4.69]

Se advierte que esta área libre es la que se encuentra entre dos tubos, así para calcular el área libre total se debe multiplicar este valor por el número de filas menos uno. Se comienza suponiendo que existen 6 filas.

En la tabla que se muestra a continuación se recogen los valores obtenidos para todos los parámetros cuyas expresiones se han indicado en este apartado:

Sección exterior de los tubos, A_o [mm ²]	506,707	Área esp exterior sup tubo exp, A_{mo} [m ² /m]	0,0707
Sección interior de los tubos, A_i [mm ²]	402,571	Área de una aleta, A_a [m ²]	0,0013
Espaciamiento entre aletas, E_a [mm]	2,815	Área esp sup de aletas, A_r [m ² /m]	0,413
Longitud de la aleta, L_a [mm]	119,69	Área esp sup tubo aleteado, A_o [m ² /m]	0,483
Densidad aletas, d_a [aletas/m]	315	Área libre entre tub alet, $A_{aire\ t}$ [m ²]	0,335
Espesor aletas, e_a [mm]	3,60E-04	Área libre entre tub alet, $A_{aire\ t}$ [m ²]-final--	1,676
D_o [mm]	25,4	n_{filas} [adim]	6
D_i [mm]	19,88	Pitch [mm]	63,5
Altura aletas, h_a [mm]	6,35	Longitud tubo, L_t [m]	9,144

4.3.7.-Diferencia de temperatura media logarítmica

Esta variable refleja la diferencia media de la temperatura entre las corrientes fría y caliente a lo largo del intercambiador. Para flujo en contracorriente, la expresión que determina su valor es la siguiente:

$$LMTD = \frac{(T_{c,L} - T_{f,L}) - (T_{c,o} - T_{f,o})}{\ln \frac{(T_{c,L} - T_{f,L})}{(T_{c,o} - T_{f,o})}} \quad [A4.70]$$

La LMTD ha sido calculada para una disposición de flujo en contracorriente pura. En este caso no es necesario el cálculo del factor de corrección de la desviación de LMTD, ya que como existe un cambio de fase el valor es 1. Esto es debido a que la corriente de la columna permanece a una temperatura prácticamente constante, y por tanto, el sistema no experimenta desviación frente a la corriente pura. Además un valor de $F=1$ justifica el empleo de un intercambiador 1-2.

Por tanto aplicando la expresión:

$$\Delta T_m = F \cdot LMTD \quad [A4.71]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tendremos en valor de LMTD corregido, una vez que se dispone de este valor, se obtiene el valor del producto $U \cdot A_{\text{transf}}$.

$T_{c,L} [^{\circ}\text{C}]$	96,76
$T_{f,L} [^{\circ}\text{C}]$	86
$T_{c,o} [^{\circ}\text{C}]$	127,7
$T_{f,o} [^{\circ}\text{C}]$	30
LMTD [$^{\circ}\text{C}$]	39,410
F	1
$\Delta T_m [^{\circ}\text{C}]$	39,410
$U \cdot A_{\text{transf}} [\text{W/K}]$	33177,264
$U \cdot A_{\text{transf}} [\text{kJ/hK}]$	119438,149

4.3.8.-Suposición del número de tubos del intercambiador

Inicialmente, hay que partir de un número de tubos arbitrario que se calcula relacionando el caudal másico de aceite necesario y el que puede ir por un tubo.

En primer lugar se calcula el caudal másico de aire necesario para satisfacer los requerimientos energéticos. Teniendo en cuenta que el calor absorbido por la corriente de butano es igual al aportado por este, resulta:

$$Q_{\text{int}} = C_{p \text{ aire}} M_{\text{aire}} (T_{f,o} - T_{f,f}) \quad [\text{A4.72}]$$

A continuación se selecciona una supuesta velocidad del aire estándar que pasa a través de los tubos. Orientativamente, se encuentra en la bibliografía rangos de velocidades típicas del aire para el funcionamiento óptimo de este tipo de equipo. Según esta el rango de velocidades está entre 3,0 y 6,1 m/s (McCabe, Smith & Harriot, 2007). Se selecciona una velocidad para comenzar el cálculo de 3,5 m/s.

Antes de continuar debemos calcular el caudal volumétrico del aire:

$$Q_{\text{air}} = \frac{M_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} \quad [\text{A4.73}]$$

Por lo tanto, el área libre para el flujo de aire es igual al caudal entre la velocidad del mismo:

$$A_{\text{aire}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{v_{\text{aire}}} \quad [\text{A4.74}]$$

Por lo tanto el número de tubos por fila se obtiene de la relación entre el área neta de aire libre y el que hay entre tubos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$n_{\text{tubos/ fila}} = \frac{A_{\text{aire}}}{A_{\text{aire tubos}}} \quad [\text{A4.75}]$$

Finalmente se calcula el número de tubos multiplicando el número de filas por los tubos que hay en cada una de ellas:

$$n_t = n_{\text{tubos/ fila}} \cdot n_{\text{filas}} \quad [\text{A4.76}]$$

En la tabla que se muestra a continuación se recogen los resultados obtenidos:

$M_{\text{aire}} [\text{kg/h}]$	83386,480
$v_{\text{aire supuesta}} [\text{m/s}]$	3,5
$Q_{\text{aire}} [\text{m}^3/\text{h}]$	75122,95
$Q_{\text{aire}} [\text{m}^3/\text{s}]$	20,867
$A_{\text{aire}} [\text{m}^2]$	5,962
$n_{\text{tubos/fila}}$	25,557
$n_{\text{tubos/fila}}$	26
n_{filas}	6
n_{tubos}	156

4.3.9.-Coeficiente global de intercambio de calor

El coeficiente global de transferencia de calor es el factor que engloba las resistencias con las que se encuentra el flujo de calor. En este caso:

- Resistencia a la convección del fluido exterior del tubo e igual a la inversa del coeficiente de película externa:

$$R_o = \frac{1}{h_o} \quad [\text{A4.77}]$$

- Resistencia a la convección del fluido interior del tubo e igual a la inversa del coeficiente de película interna:

$$R_i = \frac{1}{h_i} \quad [\text{A4.78}]$$

- Resistencia debida a la película de ensuciamiento depositada en el exterior del tubo (R_{so}).
- Resistencia debida al ensuciamiento depositada en el interior del tubo (R_{si})
- Resistencia a la conducción debida a la pared metálica del tubo (R_m)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Este término se obvia ya que al existir aletas en los tubos, en su lugar se incluye un factor de corrección en la resistencia externa que tiene en cuenta las aletas.

Como estas referencias se expresan en m^2/W , es necesario referir todos los términos a la misma superficie. Conviene elegir la superficie exterior del tubo, lo que lleva a corregir las resistencias interiores quedando la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i D_i} + R_{s,i} \frac{D_o}{D_i} + \frac{D_o \ln(r_o/r_i)}{2K_m} + R_{s,o} + \frac{1}{h_o} \quad [A4.79]$$

Por lo tanto, para estimar el coeficiente global de transferencia de calor es imprescindible calcular cada uno de estos coeficientes individuales.

4.3.9.1.-Coeficiente de película interna (h_i)

El cálculo del coeficiente se realiza despejándolo a partir de la definición del número de Nusselt (Nu).

$$Nu = \frac{h_i D_i}{K} \quad [A4.80]$$

A su vez, el número de Nusselt se puede obtener a partir de una serie de correlaciones que desarrollan la convección para flujo interno en tubos circulares. Se elige la ecuación de Akers, Dean y Crosser, ya que en el interior de los tubos se produce la condensación del vapor.

$$Nu = 0,026(Pr)^{1/3} Re^{0,8} \quad [A4.81]$$

Esta expresión solamente es válida cuando el Reynolds del vapor es mayor que 20000 y el del líquido que 5000.

El número de Reynolds para una mezcla es:

$$Re = \frac{D_i}{\mu_L} \left[G_L + G_v \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{1/2} \right] \quad [A4.82]$$

Las propiedades del líquido se calculan a la temperatura de salida del calderín y las del vapor a la entrada.

El flujo másico por unidad de área, tanto del vapor como del líquido, se calculan como si ocupasen el área total de flujo, mediante la siguiente ecuación:

$$G_L = G_v = \frac{\left(v_{tubo} / A_i \right)}{2} \quad [A4.83]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Donde la velocidad del tubo es la velocidad del vapor total entre el número de estos:

$$v_{tubo} = \frac{v}{n_t} \quad [A4.84]$$

Operando con estas ecuaciones se obtiene los siguientes valores:

Se calcula ahora el un número adimensional igual a:	G_L [kg/m ² s]	196,653	número de Prandtl, que es
	G_v [kg/m ² s]	196,653	
	v_{tubo} [kg/s]	0,158	
	Re [adim]	4,93E+04	

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad [A4.85]$$

Ya con todos estos datos podemos determinar el número de Nusselt y con este el valor del coeficiente de película interna:

Pr [adim]	4,416
Nu [adim]	242,143
h_i [W/m ² K]	707,927

Se cumplen las condiciones en las que es válida la expresión utilizada, por lo tanto, la elección de la ecuación es acertada y el resultado que hemos obtenido es válido.

$$Re_L > 5000$$

$$Re_v > 20000$$

4.3.9.2.-Coeficiente de película externa (h_o)

Para el cálculo del coeficiente de convección externo en el caso de tubos con aletas se recurre a la fórmula de Joung:

$$Nu = 0,134 \cdot Re^{0,681} \cdot Pr^{0,33} \left(\frac{E_a}{L_a} \right)^{0,2} \left(\frac{E_a}{e_a} \right)^{0,1134} \quad [A4.86]$$

Una vez conocido el número de Nusselt podremos hallar el valor del coeficiente de película interna sustituyendo en la siguiente ecuación:

$$h_o = \frac{kNu}{D_o} \quad [A4.87]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Los valores obtenidos son:

$Re_{aire}[adim]$	5112,902
$Pr[adim]$	0,721
$Nu[adim]$	24,059
$h_o[W/m^2K]$	25,575

Este coeficiente está calculado para una fila de tubos pero inicialmente hemos supuesto que el equipo tiene 6 filas. A través de la siguiente tabla, que muestra el valor de h para N filas, desde 1 hasta 10, se calcula la relación correspondiente a nuestro caso particular:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tubos al tresbolillo	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00
Tubos alineados	0,64	0,80	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99	1,00

Tabla 4.-Factor de corrección de h entre N hasta las 10 filas de profundidad

De este modo el coeficiente de película externo corregido tiene el valor de:

$h'o[W/m^2K]$	35,729
---------------	--------

4.3.9.3.-Factores de ensuciamiento interno ($R_{s,i}$) y externo ($R_{s,o}$)

El ensuciamiento en los tubos tanto interior como exteriormente reduce la cantidad de calor transmitida. Estas resistencias se toman de las tablas de las normas TEMA, que gracias a la experiencia industrial, establecen los valores de $R_{s,i}$ y $R_{s,o}$ para una amplia gama de productos industriales.

$R_{s,i}[hft^2\text{°F/Btu}]$	0,0025	$R_{s,i}[m^2K/W]$	4,40E-04
$R_{s,o}[hft^2\text{°F/Btu}]$	0,002	$R_{s,o}[m^2K/W]$	4,00E-04

4.3.9.4.-Resultado del coeficiente global de transferencia de calor

En este caso, en el que los tubos están compuestos por aletas, la resistencia global externa, ha de ser modificada por un factor de corrección que depende de la eficacia de la aleta entre otras cosas.

Primero, hay que calcular la resistencia global exterior que es igual a:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$R'_{o\ global} = \frac{1}{h'_o} + R_{s,o} \quad [A4.88]$$

A continuación se presenta la ecuación de la resistencia global corregida:

$$R_{o\ global} = R'_{o\ global} \frac{A_o}{\Omega A_f + A_{mo}} \quad [A4.89]$$

Se necesita el cálculo de la eficacia de aleta (Ω). Este se define como el cociente entre la cantidad de calor realmente transferida a la aleta y la cantidad de calor que sería transmitida si toda la superficie de la aleta estuviese a la temperatura del tubo. Su valor se estima gráficamente en función de la geometría de la aleta, la conductividad del material (k_a) y el coeficiente de convección externo (h_o). A continuación se ilustra la gráfica adecuada para nuestro caso particular:

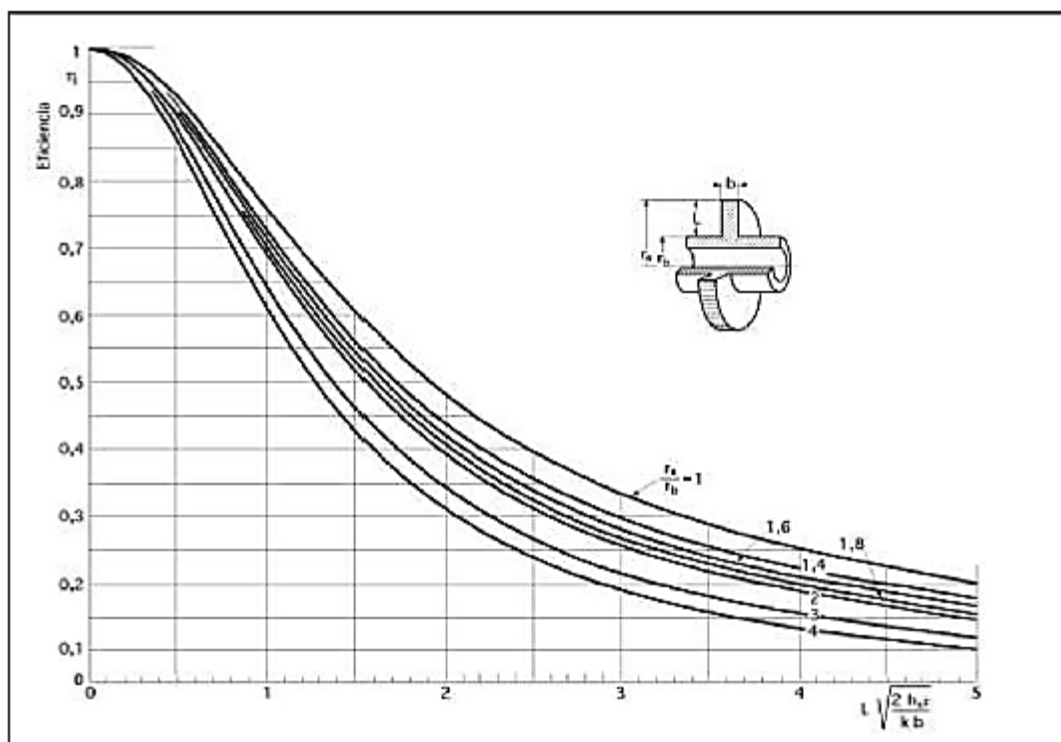


Figura 4.-Eficacia de aletas circulares de espesor constante

Por lo tanto, se determina el cociente para obtener el valor de abscisas:

$$h_o \sqrt{\frac{2 h_o}{k_a e_a}} \quad [A4.90]$$

También se calcula el parámetro que relaciona el radio del tubo y el radio incluyendo la aleta:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$\frac{h_a + \frac{D_o}{2}}{\frac{D_o}{2}} \quad [A4.91]$$

A través de estos valores y del empleo de la gráfica se obtiene una eficacia de aleta y una vez conocido este valor podemos determinar finalmente el valor del coeficiente global de intercambio:

$R'_{o\text{ global}}[\text{m}^2\text{K/W}]$	0,0284
$R_{s,o}[\text{m}^2\text{K/W}]$	0,0004
$1/h'_o[\text{m}^2\text{K/W}]$	0,02799
$R_{o\text{ global}}[\text{m}^2\text{K/W}]$	0,0289
$D_o[\text{m}]$	0,0254
$D_i[\text{m}]$	0,02264
$\ln(r_o/r_i)$	0,115
Eficacia de aleta(Ω)	0,98
Parámetro abscisas	0,155
Parámetro curva	1,5
$1/U_o[\text{m}^2\text{K/W}]$	0,0416
$U[\text{W/m}^2\text{K}]$	24,047

4.3.10.-Número de filas de tubos y proceso de iteración

A partir de este momento se comprueba la concordancia entre el número de filas supuesto y el real. De manera general, si el número real es mayor que el supuesto, se repetirá el proceso con una velocidad frontal de aire menor, o viceversa. El proceso de iteración termina cuando se determina un número de filas próximo e inferior al número entero de filas supuestas.

El área necesaria para satisfacer los requerimientos energéticos se determina a partir del coeficiente de transferencia calculado en el apartado anterior (U) y de $U \cdot A_{\text{transf}}$:

$A_{\text{transf}}[\text{m}^2]$	1,38E+03
---------------------------------	----------

Por lo tanto, el número de tubos viene dado por la siguiente fórmula:

$$n_t = \frac{A_{\text{transf}}}{L_t A_o}$$

Como se ha supuesto anteriormente que los tubos se disponen en 6 filas, en este caso el valor máximo de tubos por fila sería de 26.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

De modo que el valor real de filas necesarias es:

$A_{transf}[m^2]$	1,38E+03
$L_t[m]$	9,144
$A_o[m^2]$	0,483
$n_{tubos\ calc}$	156,08
$n_{filas\ supuesto}$	6
$n_{tubos/fila}$	26,01
n_{filas}	6

El valor real está bastante próximo y es inmediatamente inferior al supuesto por lo que lo damos por válido. De este modo los valores que seleccionamos de partida para el diseño de este equipo serán así los definitivos conservando el valor original de la velocidad del aire y el número de filas, no siendo necesario llevar a cabo un proceso iterativo de cálculo en este caso particular.

4.3.11.-Características del banco de tubos

Los tubos se agrupan formando bancos donde son sometidos a la corriente de aire. Es recomendable que estos bancos adopten una forma lo más cuadrada posible pudiendo dividirse en haces con tal fin. Específicamente, se aconseja que el valor de la anchura disponible del haz sea la cuarta parte de la longitud de los tubos. En este caso, la anchura del banco completo es menor que la cuarta parte de la longitud de este, por lo tanto solo existe un haz. Se comprueba, además, que la anchura del haz está en el rango recomendado (1,2-4,8m).

Para calcular las dimensiones finales del banco de tubos se disponen las siguientes relaciones:

$$Anch_{haz} = A_c + 200 [A4.93]$$

Donde:

· $Anch_{haz}$ es el ancho total del banco de tubos en mm.

· A_c es la altura mínima del cabezal de los tubos en mm.

Para hallar A_c se utiliza la siguiente correlación:

$$A_c = (N_{tubos/fila} - 1) P' + D_{alata} + 200 [A4.94]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por lo tanto la anchura total del haz es:

$Anch_{haz}[mm]$	2025,6
$A_c[mm]$	1825,6
$n_{tubos}/fila$	26
$P'[mm]$	63,5
$D_{aleta}[mm]$	38,1

La anchura total de la sección(A_s) para el sistema de banco de tubos es igual que la del haz, ya que solo existe uno. La longitud de éste coincide con la de los tubos.

4.3.12.-Diseño de los ventiladores

4.3.12.1.-Diseño y número de ventiladores

En primer lugar, se define el diámetro supuesto del ventilador y se calcula su área. es aconsejable que el diámetro de los ventiladores sea ligeramente menor que la anchura del haz de tubos. Por lo tanto:

$$D_{vent} \leq Anch_{haz} [A4.95]$$

Así el área del ventilador es:

$$A_{vent} = \pi \frac{D_{vent}^2}{4} [A4.96]$$

En cuanto a la distancia entre el ventilador y la base de los tubos ($d_{vent-haz}$), se recomienda que su valor se encuentre entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del diámetro del ventilador.

$$d_{vent-haz} \geq \left(\frac{1}{2} D_{vent}, \frac{3}{4} D_{vent} \right) [A4.97]$$

Se selecciona el valor mayor para que tenga una mayor área de ventilación.

Se ha de tener en cuenta, que debido a la distancia que existe entre los ventiladores y los tubos el aire llega con un ángulo de dispersión(α_{aire}). Según la normativa, este ángulo no debe exceder los 45°. Para conocer el diámetro del aire proyectado en el banco de tubos(D_{proy}) se considera la siguiente ecuación:

$$D_{proy} = 2d_{vent-haz} \tan(\alpha_{aire}) + D_{vent} [A4.98]$$

Pero hay que tener en cuenta que no toda la sección proyectada coincide con el área de tubos ventilada ya que el banco de tubos tiene forma rectangular. Por lo tanto, al valor del área proyectada (A_{proy}) se le resta el tramo desviado (A_{desv}):

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$A_{proy} = \pi \frac{D_{proy}^2}{4} \quad [A4.99]$$

$$A_{desv} = 2A_{proy} \left[\frac{\arcsen\left(\frac{\psi}{D_{proy}}\right)}{180} - \frac{\left(\frac{\psi}{D_{proy}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\psi}{D_{proy}}\right)^2}}{\pi} \right] \quad [A4.100]$$

Donde ψ es la longitud mínima de tubo que ventila un ventilador y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\psi = 2 \sqrt{\left(\frac{D_{proy}}{2}\right)^2 - \left(\frac{Anch_{haz}}{2}\right)^2} \quad [A4.101]$$

Los resultados que se obtienen al operar con estas expresiones se recogen en la siguiente tabla:

$D_{vent \text{ supuesto}} [\text{mm}]$	1981,2
$D_{vent \text{ supuesto}} [\text{ft}]$	6,5
α_{aire}	0,785
$D_{vent \text{ supuesto}} [\text{m}]$	1,9812
$A_{vent} [\text{m}^2]$	3,083
$d_{vent-haz} \text{ opción 1} [\text{m}]$	0,991
$d_{vent-haz} \text{ opción 2} [\text{m}]$	1,486
$d_{vent-haz} \text{ medio} [\text{m}]$	1,238
α_{aire}	45
$D_{proy} [\text{m}]$	4,458
$A_{proy} [\text{m}^2]$	15,607
$\psi [\text{m}]$	3,971
$A_{desv} [\text{m}^2]$	6,899

Por lo tanto, la diferencia entre estas áreas origina el valor del área de incidencia en el banco de tubos (A_{inc}):

$$A_{inc} = A_{proy} - A_{desv} \quad [A4.102]$$

En nuestro caso hemos obtenido el siguiente valor:

$A_{inc} [\text{m}^2]$	8,708
------------------------	-------

Según la normativa, cada ventilador debe tener un tamaño tal que ocupe al menos el 40% del área de los tubos que ventila, por lo tanto:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Relación áreas	0,354
----------------	-------

$$\frac{A_{vent}}{A_{inc}} = 0,354 < 0,4$$

Para cumplir esta condición se modifica el valor del ángulo de dispersión del aire (α_{aire}) mediante un proceso iterativo. Para tal resolución se emplea la herramienta *Solver* del programa Excel, considerando como celda objetivo el valor del cociente entre el área del ventilador y la incidente en los tubos e igualándola a 0,4 y como celda ajustable el ángulo. El valor del ángulo de dispersión resulta:

α_{aire}	38,96
-----------------	-------

Con esta nueva condición se recalculan las variables obteniéndose los siguientes datos:

$D_{proy}[m]$	3,984
$A_{proy}[m^2]$	12,465
$\psi[m]$	3,430
$A_{desv}[m^2]$	4,758
$A_{inc}[m^2]$	7,707
Relación áreas	0,399

Tabla 1

Para el cálculo del número de ventiladores, se divide el área total del haz de tubos (A_{haz}) entre el área de dicho haz ventilada por un solo ventilador (A_{inc}):

$$n_{vent} = \frac{A_{haz}}{A_{inc}} = \frac{L_t Anch_{haz}}{A_{inc}} \quad [A4.104]$$

La distancia entre los centros de los ventiladores es:

$$d_{vent-vent} = \frac{L_t}{n_{vent}} \quad [A4.105]$$

Y la distancia horizontal entre el centro de los ventiladores extremos y el fin adyacente del haz de tubos es:

$$d_{ext vent-haz} = \frac{d_{vent-vent}}{2} \quad [A4.106]$$

En la siguiente tabla se recogen los valores del número de ventiladores y sus distancias en la instalación:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$n_{vent,calc}$	2,403
$n_{vent\ instalados--real--}$	3
$d_{vent-vent}[m]$	3,048
$d_{ext\ vent-haz}[m]$	1,524

El valor de la distancia entre ventilador y ventilador es solo ligeramente menor que el de la longitud mínima ventilada, lo que significa que se puede trabajar con un ángulo de dispersión menor sin problema.

4.3.12.2.-Potencia del ventilador

La potencia requerida por el sistema de ventilación se determina a través de la siguiente ecuación:

$$P_{real} = \frac{P_i}{\eta E} \quad [A4.107]$$

Siendo:

- P_{real} la potencia real requerida por el sistema
- P_i la potencia ideal del sistema en CV
- η el rendimiento del ventilador
- E el rendimiento de los impulsores

La potencia ideal es igual a:

$$P_i = 0,04 S_f \quad [A4.108]$$

Donde S_f es la superficie frontal del sistema expresada en ft^2 :

$$S_f = Anch_{haz} L_t \quad [A4.109]$$

El rendimiento mecánico del ventilador quedó fijado al comienzo del anexo y es de un 75% y el de los impulsores es de un 95%.

Una vez determinada la potencia total podremos conocer la de cada ventilador individual:

$$P_{vent} = \frac{P_{real}}{n_{vent}} \quad [A4.110]$$

Sustituyendo datos en las expresiones anteriores se obtienen los siguientes resultados:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$P_{real}[CV]$	11,193
$P_{real}[W]$	8232,177
$P_i[CV]$	7,97476
$P_i[W]$	5865,426
$S_f[m^2]$	18,522
$S_f[ft^2]$	199,369
$Anch_{haz}[m]$	2,026
$L_t[m]$	9,144
Rend vent, $\eta[adim]$	0,75
Rend mec, $E[adim]$	0,95
$P_{vent}[W]$	2744,059
$P_{vent}[kW]$	2,744

4.3.13.-Diseño mecánico

En este apartado se persigue determinar el valor del espesor de los tubos.

4.3.13.1.-Espesor de los tubos

De acuerdo con el código ASME B31.3, el espesor de los tubos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$t = \left(\frac{P_d d_o}{2(\sigma E + P_d Y)} + C \right) \frac{1}{1 - (M/100)} \quad [A4.111]$$

Donde:

- P_d es la presión de diseño (psi) en los tubos. Se calcula como la presión máxima de operación más el 10%.

$P_{oper}[Pa]$	1426000
$P_d[Pa]$	1568600
$P_d[psi]$	227,506

- d_o es el diámetro exterior del tubo:

$D_o[in]$	1
-----------	---

- T_d es la temperatura de diseño. Se toma el mayor de los valores de temperatura y se le añaden 20°C.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$T_d[^\circ\text{C}]$	147,7
$T_d[^\circ\text{F}]$	297,86

- σ es la tensión máxima admisible (psi).

Se recoge en tablas de materiales del código ASME y depende de la temperatura de diseño. Para acero inoxidable SA-106-C, a una temperatura de hasta 300°F se tiene que la tensión es igual a:(véase la **tabla A8.5 del anexo 8**).

$\sigma(\text{psi})$	20000
----------------------	-------

• E es el cociente de soldadura. Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por lo tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es de:(véase la **tabla A8.7 del anexo 8**).

E	0,85
---	------

• C es el desgaste a la corrosión. Se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria.

$$C = 0,005 \text{ in} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 2,54 \text{ mm}$$

• Factor Y. Depende de la temperatura de diseño y del material de los tubos. Su valor se recoge en la **tabla A8.8**; para un acero al carbono el valor es:

Y	0,4
---	-----

- M es la tolerancia de fabricación. La tolerancia en el espesor de la pared es de 12,5%.

Sustituyendo todos los valores de las variables explicadas en la ecuación inicial tendremos el valor del espesor.

$t[\text{in}]$	0,107
----------------	-------

El espesor normalizado inmediatamente mayor es el de:

$t[\text{in}]_{\text{normalizado}}$	12
$t[\text{mm}]_{\text{normalizado}}$	2,76
BWG	12

4.3.14.-Pérdidas de carga

En este apartado se procede a calcular las pérdidas de carga del fluido que pasa por los tubos.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

4.3.14.1.-Pérdida de carga en el interior de los tubos

Para estimar la pérdida de carga que presenta el fluido por el interior de los tubos se utiliza la ecuación de Fanning:

$$\Delta P = \frac{fG^2L}{d_i\rho} \text{ [A4.112]}$$

Donde:

- f es el factor de fricción
- G es la velocidad másica del fluido que circula por los tubos.
- L es la longitud de los tubos
- d_i es el diámetro interno de los tubos
- ρ_{fc} es la densidad del fluido calefactor que circula por el interior de los tubos

El primer paso es realizar el cálculo de la velocidad másica G, ya que es necesaria para la ecuación y para el cálculo del factor de fricción f.

$$G = \frac{4W_{fc}}{\pi d_i^2 N_t} \text{ [A4.113]}$$

En segundo lugar, debemos determinar el número de Reynolds para poder hallar el factor de fricción:

$$Re = \frac{D_i G}{\mu} \text{ [A4.114]}$$

Se obtienen los valores siguientes:

L _{tubos} [m]	9,144
D _i [m]	0,02264
Densidad (ρ _{fc})[kg/m ³]	475,6
W _{fc} [kg/s]	3,8
n _t	156
G[kg/m ² s]	60,508
Viscosidad (μ _{fc})[Pa·s]	9,04E-05
Re[adim]	15160,603
Rugosidad relativa, ε	0,0002
Factor fricción, f	0,028

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

A partir del diámetro interno (0,89 in) se obtiene una rugosidad relativa para aceros comerciales igual a 0,0002, según las **figura A8.2 del anexo 8**.

En función del valor del Reynolds y la rugosidad relativa, mediante la gráfica de Moody (**Figura A8.1 del anexo8**), se obtiene un valor de factor de fricción igual a 0,028.

Finalmente sustituimos en la ecuación anterior para obtener el valor de la pérdida de carga:

$\Delta P[\text{kg/ms}^2]$	87,058
$\Delta P[\text{bar}]$	8,71E-04

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ANEXO 5.-ACUMULADOR DE REFLUJO

5.1.-Introducción

Se diseña un depósito para la acumulación del reflujo de la columna. El fluido que sale de la torre por cabeza, tras pasar por el condensador, se acumula en el depósito de reflujo.

A continuación se indican los pasos básicos que se llevan a cabo tanto para el dimensionamiento como para el diseño mecánico de este equipo.

5.2.-Caracterización del fluido de operación

El líquido acumulado son las parafinas lineales obtenidas por cabeza tras su posterior condensación en el aerorefrigerador. Las condiciones de entrada del fluido son una presión de 1426 kPa y una temperatura de 96,76 °C.

El caudal másico de entrada al depósito coincide con el de salida del condensador y es igual a 13680 Kg/h.

Se necesita el valor de su caudal volumétrico el cual se obtiene a partir del valor de densidad del fluido:

$$Q_{vDRF} = \frac{L_{DRF}}{\rho_L} \quad [A5.1]$$

$$Q_{vDRF} = 28,76 \text{ m}^3/\text{h} \quad [A5.2]$$

5.3.-Capacidad del depósito

La capacidad del depósito de reflujo depende directamente del tiempo de residencia del líquido en su interior. Según las recomendaciones para este tipo de equipos, se considera un tiempo suficiente de 15 minutos.

Así, el volumen mínimo del botellón de reflujo es:

$$V_{\min DRF} = t_r Q_{vDRF} \quad [A5.3]$$

$$V_{\min DRF} = 7,19 \text{ m}^3 \quad [A5.4]$$

Según las reglas heurísticas para la construcción de depósitos numeradas en la memoria del presente proyecto (véase el apartado 9.1 de la Memoria), al encontrarse el valor del volumen entre 3,8 m³ y 38 m³, el depósito es un tanque horizontal sustentado por una cimentación.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Además, como su capacidad es mayor a $1,9 \text{ m}^3$, nunca se debe llenar por encima del 90%, por lo tanto el volumen de este es un poco mayor:

$$V_{DRF}=7,988\text{m}^3 \approx 8\text{m}^3$$

5.4.-Dimensiones óptimas del depósito

Para hallar el valor de las dimensiones óptimas y, así, realizar un diseño óptimo con el mínimo material es necesario obtener la relación entre la longitud y el diámetro del depósito.

Existe un procedimiento válido para presiones inferiores a 1000 psi para realizar un diseño óptimo en depósitos a presión (Megyesy, 1992).

En primer lugar, se calcula el valor de un coeficiente F igual a:

$$F = \frac{P_D}{C\sigma E} \quad [\text{A5.5}]$$

Donde:

- P_D (psi) es la presión de diseño. Se calcula eligiendo el mayor de los siguientes valores: la presión máxima de operación que se da en la columna más el 10%, la presión máxima más 2 kg/cm^2 o $3,5 \text{ kg/cm}^2$.

$P_{\text{operación}}[\text{kg/cm}^2]$	14,536
$P_{d1}[\text{kg/cm}^2]$	15,990
$P_{d2}[\text{kg/cm}^2]$	17,036
$P_{d3}[\text{kg/cm}^2]$	3,5
$P_{\text{diseño}}[\text{psi}]$	242,394

- C es el desgaste a la corrosión y su valor es igual a 2,54 mm, como en el resto de los equipos que hasta ahora hemos diseñado.

- σ es la tensión máxima admisible. Su valor se recoge en las tablas de materiales del Código ASME B31.3 (véase la **tabla A8.4 del anexo 8**). Para carcasas de SA-283 C sometidas a una temperatura de 250°F, el valor es:

$\sigma[\text{psi}]$	15700
----------------------	-------

- E es el valor de la eficiencia de junta (ver **tabla A8.7 del anexo 7**), que tiene un valor de:

E	0,8
---	-----

Se sustituyen los valores para conocer el valor de F:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$F[\text{in}^{-1}]$	0,193
---------------------	-------

Con este coeficiente y el valor del volumen del recipiente, se recurre a la siguiente gráfica donde se obtiene el diámetro óptimo del depósito:

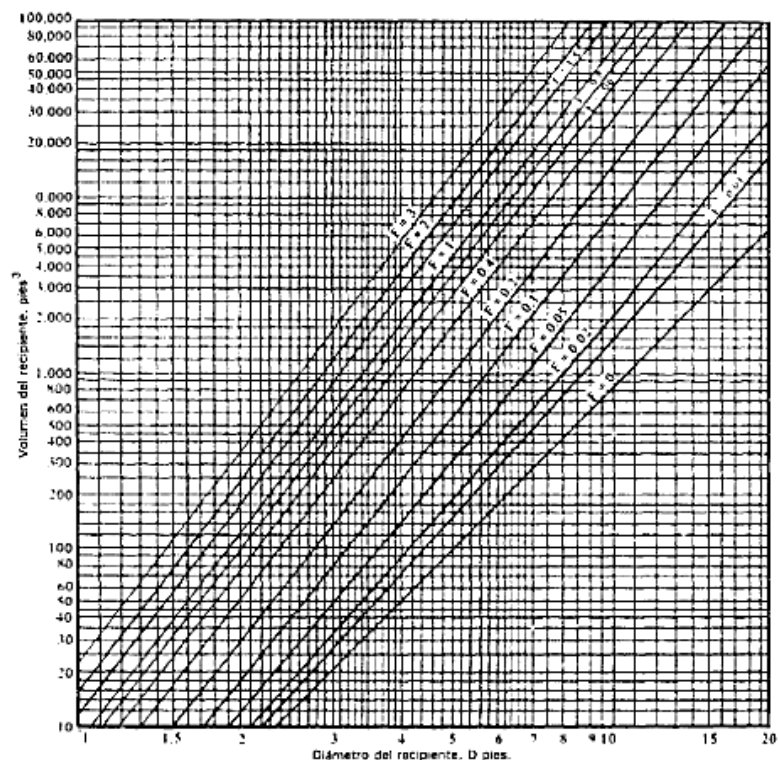


Figura 1.-Gráfica para determinar el tamaño óptimo del depósito (Megyesy, 1992)

De este modo se tiene que el diámetro óptimo es igual a:

$D_{\text{óptimo}}[\text{ft}]$	8,5
$D_{\text{óptimo}}[\text{m}]$	2,59

Por lo tanto, si se simplifica la forma del depósito considerando cabezales planos, la longitud de la carcasa cilíndrica se calcula geoméricamente a través de la siguiente ecuación:

$$L_{DRF} = \frac{V_{DRF}}{\pi \left(\frac{D_{DRF}}{2} \right)^2} \quad [\text{A5.6}]$$

Con la posterior adición de los cabezales la longitud y el volumen total variaran levemente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$L_{DRF}[m]$	1,364
--------------	-------

5.5.-Fondos del depósito

El acumulador consta de dos cabezales extremos idénticos. Estos son toriesféricos y de tipo Korbogen, ya que cumplen algunas de las condiciones para ser Korbogen, debido a la presión de diseño:

- ✓ Presión de diseño igual o superior a 7kg/cm^2
- ✓ Temperatura de diseño superior a 350°C
- ✓ Fondos inferiores de recipientes verticales cuya relación altura/diámetro sea superior a 10.

Se recuerda que para este tipo de fondo existen diferentes fórmulas simplificadas para calcular las dimensiones características del cabezal (Código ASME).

— Radio mayor(L):

$$L = 0,8D_i \quad [\text{A5.7}]$$

— Radio menor(r):

$$r = 0,154D_i \quad [\text{A5.8}]$$

— Altura de la cúpula(H):

$$H = 0,26D_i \quad [\text{A5.9}]$$

— Altura de la faldilla(h):

$$h = 3,5t \quad [\text{A5.10}]$$

— Volumen en m^3 (V):

$$Volumen = 0,13D_i^3 \quad [\text{A5.11}]$$

El cálculo de la faldilla depende del espesor que será calculado en el siguiente apartado.

Sustituyendo el valor del diámetro interior previamente calculado en estas expresiones se obtienen los siguientes valores para los parámetros geométricos del recipiente:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$D_i[m]$	2,591
$L[m]$	2,073
$r[m]$	0,399
$H[m]$	0,674
$V_f[m^3]$	2,261

5.6.-Espesor

Para el cálculo del espesor requerido se ha considerado como controlantes los esfuerzos inducidos por la carga de presión interna. Se indica que tanto la carcasa como los fondos dispondrán el mismo espesor, por lo tanto se realizarán los cálculos en ambas partes.

→Envolvente cilíndrica

Según el código ASME VIII División 1 para equipos a presión es necesario calcular el espesor de la envolvente cilíndrica dependiendo tanto de la tensión circunferencial como de la longitudinal que se produce en estos. Posteriormente se tomará en consideración el mayor de los espesores obtenidos en el procedimiento.

— Tensión circunferencial:

$$t_{circ} = \frac{P_d R}{\sigma E - 0,6 P_d} \quad [A5.12]$$

— Tensión longitudinal:

$$t_{long} = \frac{P_d R}{2\sigma E + 0,4 P_d} \quad [A5.13]$$

Donde:

- P_d (psi): presión de diseño para toda la columna
- R : radio de la columna
- T_d : temperatura de diseño
- σ (psi): tensión máxima admisible
- E : coeficiente de soldadura
- C : desgaste a la corrosión

Se calculan a continuación cada uno de estos valores:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- P_d (psi): presión de diseño para toda la columna

Se calcula eligiendo el mayor de los siguientes valores: la presión máxima de operación que se da en la columna más el 10%, la presión máxima más 2 kg/cm² o 3,5 kg/cm².

$P_{operación}$ [kg/cm ²]	14,536
P_{d1} [kg/cm ²]	15,990
P_{d2} [kg/cm ²]	17,036
P_{d3} [kg/cm ²]	3,5

Nos quedamos con la mayor de las presiones posibles y la expresamos en psi:

$P_{diseño}$ [psi]	242,394
--------------------	---------

- R: radio de la columna

Se calcula como la mitad del valor del diámetro del recipiente, valor que hemos determinado en el apartado anterior:

R[m]	1,295
------	-------

- T_d : temperatura de diseño

Se toma el mayor de los valores de temperaturas de operación y se le añaden 20 °C.

$T_{diseño}$ [°F]	242
-------------------	-----

- σ (psi): tensión máxima admisible

Se recoge en las tablas de materiales del Código ASME y depende de la temperatura de diseño. Para acero inoxidable SA 283 C a una temperatura de hasta 250°F se tiene que la tensión es igual a: (ver **tabla A8.3 del anexo 8**).

σ [psi]	15700
----------------	-------

- E: coeficiente de soldadura

Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por la tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es de 0,85 (véase **tabla A8.7 del anexo 8**).

E	0,8
---	-----

- C: desgaste a la corrosión

Esta variable depende fundamentalmente de dos criterios. Por un lado la vida deseada de un recipiente es una cuestión económica, así los recipientes principales o mayores se diseñan para una vida larga (15 a 20 años) mientras que los secundarios para períodos menores (8 a 10

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

años). Y en segundo lugar, se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria para este tipo de recipientes.

$$C = 0,005 \text{ in} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 2,54 \text{ mm}$$

Una vez hallamos seleccionado el espesor que vamos a emplear en nuestra torre debemos sumar este desgaste por corrosión para obtener el valor final.

Pues bien, los valores de las tensiones ya calculadas son:

$t_{\text{circ}}[\text{in}]$	0,996
$t_{\text{circ}}[\text{mm}]$	25,293
$t_{\text{long}}[\text{in}]$	0,490
$t_{\text{long}}[\text{mm}]$	12,452

→Fondos

Nos disponemos a determinar el espesor de los fondos según el Código ASME a partir de las siguientes expresiones:

Calculadas estas demisiones, nos disponemos a determinar el espesor de la cúpula según el código ASME a partir de la siguiente ecuación:

$$t_{fi} = \frac{MP_d L}{2\sigma E - 0,2P_d} \quad [\text{A5.14}]$$

Siendo M un parámetro que depende de las dimensiones de la tapa toriesférica:

$$M = \frac{1}{4} \left[3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right] \quad [\text{A5.15}]$$

Operando con estas expresiones se tienen los siguientes resultados:

L[m]	2,073
r[m]	0,399
M	1,320
$P_{\text{diseño}}[\text{psi}]$	242,394
$\sigma[\text{psi}]$	15700
E	0,8
$t_{fi}[\text{in}]$	1,041
$t_{fi}[\text{mm}]$	26,447

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Una vez que tenemos estos valores se compara el resultado del espesor en cada parte y se deduce que el máximo necesario es 26,45 mm, al que se le suma la corrosión obteniéndose un valor de espesor de:

$$\text{Espesor} = 26,45 + 2,54 = 28,99 \text{ mm} \approx 29 \text{ mm}$$

Se comprueba si el espesor hallado es mayor que el espesor determinado por norma:

— Exigido por el código ASME VII-1:

$$t_{\min}(\text{mm}) = 2,50 + 2,54 = 5,54 \text{ mm}$$

— Según la fórmula para aceros inoxidables:

$$t_{\min}(\text{mm}) = 3 \text{ mm}$$

Por tanto el espesor mínimo para la envolvente será de 29 mm.

Se toma como espesor el comercial inmediatamente superior a 29mm, que, según la **tabla A8.20 del anexo 8**, es:

$$t = 1,25 \text{ in} = 31,70 \text{ mm}$$

5.7.-Determinación definitiva de las dimensiones

Con los datos de espesor y por lo tanto de diámetro exterior se recalculan las dimensiones características del depósito.

— Longitud total(L'_{DRF}):

$$L'_{DRF} = L_{DRF} + 2H \quad [\text{A5.16}]$$

— Volumen total(V'_{DRF}):

$$V'_{DRF} = V_{DRF} + 2V_f \quad [\text{A5.17}]$$

En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos:

$D_o[\text{m}]$	2,654
$L[\text{m}]$	2,123
$r[\text{m}]$	0,409
$H[\text{m}]$	0,690
$h[\text{m}]$	0,093
$L'_{DRF}[\text{m}]$	2,744
$V'_{DRF}[\text{m}^3]$	11,712

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por último se obtiene la fracción de volumen ocupado en el botellón de reflujo para comprobar que sea menor del 90%.

$$\frac{V_{\min}}{V'_{DRF}} < 0,9 \quad [A5.18]$$

Comprobamos que cumplimos esta condición:

V_{\min}/V'_{DRF}	0,614
---------------------	-------

5.8.-Aislante

El termoaislante elegido para cubrir el acumulador es lana de roca, ya que cubre las necesidades técnicas del equipo.

Para una temperatura máxima de operación en la carcasa de hasta 100°C, se necesita un espesor de calorifugado de 50 mm.

ANEXO 6.-DISEÑO DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN

6.1.-Introducción

El diseño de las líneas del presente Proyecto Fin de Carrera se simplifica desarrollando diferentes tramos de conducción que conectan los diversos equipos teniendo en cuenta los accesorios de tuberías, etc.

En el presente anexo se va a proceder a diseñar las tuberías que conducen los fluidos de equipo a equipo. Su dimensionamiento es principalmente función del fluido que circula en ellas y de las características del material con el que se fabrican.

El objetivo del diseño es calcular el diámetro óptimo, la velocidad del fluido en su interior, el espesor necesario para soportar todas las tensiones y las pérdidas de carga e función de la longitud de las tuberías y de las diferencias de altura.

Habrà que estimar si las pérdidas de carga son admisibles o si, por el contrario, se debe ayudar a superar dichas pérdidas con equipos auxiliares de bombeo.

➤ Para conseguir hallar todos los parámetros necesarios se ha seguido el código ASME B31.3 “Process Piping” para el diseño de tuberías a presión.

6.1.1.- Enumeración de conducciones y tramos

✓ **Conducción n°1:** Conduce el fluido desde unidades anteriores de refinería hasta el horno calentamiento (HC) de nuestro conjunto de diseño. El diseño de la tubería comienza sobre la situación en la planta de la unidad anterior.

— Tramo n°1: Conduce el fluido hasta la bomba de alimentación(BA)

— Tramo n°2:Transporta el fluido desde la bomba (BA) hasta el horno de calentamiento(HC)

✓ **Conducción n°2:** Conduce el hidrógeno desde las unidades de aprovisionamiento de gas hasta el horno de calentamiento (HC).

— Tramo n°3:Conduce el hidrógeno hasta el compresor de alimentación(CA)

— Tramo n°4: transporta el hidrógeno desde el compresor (CA) hasta el horno de calentamiento (HC).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Conducción nº3:** Conduce la corriente de hidrógeno en las condiciones de presión y temperatura adecuadas para la reacción desde el horno de calentamiento (HC) hasta los reactores de hidrodesulfuración (RHDS).

— Tramo nº5: Conduce el hidrógeno desde el horno de calentamiento (HC) hasta el compresor de hidrógeno de reacción (CHR).

— Tramo nº6:Transporta el hidrógeno desde el compresor(CHR) hasta la T de bifurcación(T1), que divide la corriente en dos caudales idénticos, uno para cada uno de los reactores(RHDS)

— Tramo nº7: Inyecta la corriente de hidrógeno el en el primero de los reactores(RHDS1)

— Tramo nº8:alimenta de hidrógeno al segundo reactor de hidrógenodesulfuración(RHDS2).

✓ **Conducción nº4:** Transporta la alimentación de gasóleo ligero desde el horno de calentamiento (HC) hasta los reactores (RHDS).

— Tramo nº9:conecta el horno(HC) con la bomba de impulsión de la alimentación en condiciones de operación(BAC)

— Tramo nº10: Transporta el fluido desde la bomba (BAC) hasta la T de bifurcación de la corriente de gasóleo (T2).

— Tramo nº11:Alimenta de gasóleo al reactor(RHDS1)

— Tramo nº12:Alimenta de gasóleo al reactor(RHDS2)

✓ **Conducción nº5:** Transporta el producto de reacción desde los reactores (RHDS) hasta la unidad de aminas (UA).

— Tramo nº13:Conduce el producto del reactor(HDS1) hasta el punto de mezcla(PM)

— Tramo nº14:Conduce el producto del reactor(HDS2) hasta el punto de mezcla(PM)

— Tramo nº15:Conecta el punto de mezcla con la bomba de alimentación de la unidad de aminas(BAUA)

— Tramo nº16:Transporta la corriente de producto desde la bomba(BAUA) hasta la unidad de aminas(UA)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Conducción nº6:** es la que comunica la unidad de aminas(UA) con la columna de destilación(CD)

— Tramo nº17:Conduce el líquido desde la unidad de aminas(UA) hasta la bomba de alimentación de la columna de destilación(BACD)

— Tramo nº18:Transporta el fluido desde la bomba(BACD) hasta el intercambiador de calor de acondicionamiento de la alimentación(ICA)

— Tramo nº19: conecta el intercambiador (ICA) con la columna de destilación (CD).

✓ **Conducción nº7:** comprende el entramado de tuberías de la zona de cabezas.

— Tramo nº20:Conecta la columna de destilación(CD) con el condensador aéreo(AE)

— Tramo nº21:enlaza el condensador(AE) con el acumulador de reflujo(DRF)

— Tramo nº22:lleva el líquido hasta el punto de bifurcación de destilado(TRF)

— Tramo nº23: Conecta el caudal de destilado que se recircula a la columna con la bomba de reflujo (BRF).

— Tramo nº 24: Conduce el reflujo desde la bomba (BRF) hasta la columna de destilación (CD).

— Tramo nº25: Distribuye la otra parte del fluido que sale del acumulador de reflujo (DRF) hacia otras unidades de refinería que harán uso del butano obtenido, como las unidades de gases licuados del petróleo (GLP).

✓ **Conducción nº8:**comprende el entramado de tuberías de la zona de colas

— Tramo nº26: Transporta el líquido del fondo de la columna (CD) hacia el calderín (CV).

— Tramo nº 27:devuelve el vapor desde el calderín(CV) hacia la columna de destilación(CD)

— Tramo nº 28: Transporta el fondo de la columna (CD) hacia la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

6.2.-Diseño mecánico e hidromecánico de tuberías

6.2.1.-Estimación del diámetro interior de la tubería

Para hacer una primera aproximación de este valor se recurre al caudal volumétrico del fluido y, a partir de una velocidad supuesta (valores tomados de la bibliografía), se obtiene un diámetro interno.

El valor de la velocidad se selecciona considerando los siguientes intervalos representativos de velocidad en tuberías (McCabe, Smith, & Harriot, 2007):

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5 – 1	0.15 – 0.30
	Entrada de bomba	1 – 3	0.3 – 0.9
	Salida de bomba	4 – 10	1.2 – 3
	Línea de Conducción	4 – 8	1.2 – 2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2 – 0.5	0.06 – 0.15
	Salida de bomba	0.5 – 2	0.15 – 0.6
Vapor de Agua		30 – 50	9 – 15
Aire o gas		30 – 100	9 – 30

Tabla 1.-Velocidad en tuberías según fluido y tipo de flujo

Según el tipo de fluido, en el caso del presente Proyecto se trata de un fluido poco viscoso en las condiciones de operación con una viscosidad menor a 0,5 cP, y el flujo de este (si va por gravedad, entrada o salida de bomba) se selecciona una velocidad orientativa para cada caso.

Este cálculo se realiza a través de las siguientes expresiones:

$$Q_{vol} = \frac{W_{máscio}}{\rho} \quad [A6.1]$$

$$v = \frac{Q_{vol}}{\pi \frac{D_{itrano}^2}{4}} \quad [A6.2]$$

$$D_{itrano} = \sqrt{\frac{4Q_{vol}}{\pi v}} \quad [A6.3]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

6.2.2.-Obtención del diámetro exterior y nominal

A partir de las **tablas A8.6 del anexo 8** que muestran los diferentes diámetros nominales existentes para las conducciones comerciales, se obtiene el diámetro exterior y el nominal. Por lo tanto, se selecciona como diámetro exterior del tramo, el comercial inmediatamente superior al diámetro interior calculado en el paso anterior.

6.2.3.-Espesor del termoaislante que cubre las conducciones del tramo

El termoaislante está compuesto de fibra de vidrio y su espesor se determina a partir de la **tabla A8.21 del anexo 8** donde, a partir de la temperatura de diseño del fluido que recorre la tubería y el diámetro nominal, se obtiene el valor de este en mm.

De este modo se conoce el diámetro exterior con aislante como:

$$D_{o\text{tramo}}^{\text{aisl}} = D_o + 2t^{\text{aisl}} \quad [\text{A6.4}]$$

6.2.4.-Diseño mecánico de las conducciones

De acuerdo con el código ASME B31.3, el espesor de los tubos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$t = \left(\frac{P_d D_o}{2(\sigma E + P_d Y)} + C \right) \frac{1}{1 - \left(\frac{M}{100} \right)} \quad [\text{A6.5}]$$

Donde:

- P_d es la presión de diseño (psi) en los tubos. Se calcula como la presión máxima de operación más el 10%.
- T_d es la temperatura de diseño. Se toma el mayor valor de temperatura y se le añaden 20°C.
- σ es la tensión máxima admisible (psi). Se recoge en tablas de materiales del Código ASME y depende de la temperatura de diseño (véase la **tabla A8.5 del anexo 8**).
- E es el coeficiente de soldadura. Se selecciona junta a tope con doble cordón de soldadura radiografiado por puntos (spots), por lo tanto y según el apartado UW-12 de la normativa ASME en su sección VIII el valor de este es (véase la **tabla A8.7 del anexo 8**):
- C es el desgaste a la corrosión. Se considera que una corrosión de 5 milésimas de pulgada al año es satisfactoria.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

$$C = 0,005 \text{ in} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 2,54 \text{ mm}$$

- Factor Y. Depende de la temperatura de diseño y del material de los tubos. Su valor se recoge en la **tabla A8.8 del anexo 8**. Para un acero al carbono el valor es:

Y[adim]	0,4
---------	-----

- M es la tolerancia de fabricación. La tolerancia en el espesor de la pared es de 12,5%.

A partir del espesor obtenido se selecciona en la **tabla A8.6 del anexo 8**, dentro del diámetro exterior seleccionado, el espesor inmediatamente mayor. Así se conoce el espesor y el diámetro interior definitivo.

6.2.5.-Velocidad del fluido real

Despejando de la siguiente expresión se obtiene el valor real de la velocidad del fluido por la conducción:

$$v = \frac{4 \cdot Q_{vol}}{(D_i)^2 \pi} \quad [\text{A6.7}]$$

6.2.6.-Desarrollo de los cálculos

6.2.6.1.-Cálculo del tramo 1

Vamos a explicar de forma más detallada los cálculos del tramo 1, dejando indicados los pasos que se siguen, para el resto de los casos los pasos a seguir son idénticos y los resultados obtenidos se recogerán en tablas que se exponen más adelante.

6.2.6.2.-Diámetro interior estimado

La velocidad estimada del fluido es igual a 0,6 m/s ya que este tramo se sitúa a la entrada de la bomba de alimentación. Por tanto los valores de caudal volumétrico y diámetro interior son:

Q[m ³ /s]	0,04
D _{i sup} [m]	0,291
D _{i sup} [in]	11,47

Estos valores se han determinado empleando las ecuaciones indicadas en el apartado 2.1 de este anexo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

6.2.6.3.-Diámetro exterior y nominal

A partir de la tabla de propiedades de las tuberías de acero (**Tablas A8.6 del anexo 8**) se determina el valor del diámetro exterior y del diámetro nominal:

$D_N[\text{in}]$	12
$D_o[\text{mm}]$	323,8

6.2.6.4.-Espesor del aislante

Conocida la temperatura de operación máxima del fluido a través de la conducción 20°C, se designa un valor de 38 mm de espesor de termoaislante de fibra de vidrio (véase la **tabla A8.21 del anexo 8**).

El cálculo del valor del diámetro exterior con aislante se obtiene a partir de la ecuación A6.4.

$t_{\text{aislante}}[\text{mm}]$	38
$D_o^{\text{aislante}}[\text{mm}]$	399,8

6.2.6.5.-Diseño mecánico

Para realizar el cálculo del espesor del material de la tubería se muestra el valor de la presión de diseño que es igual a 16,17 psi y el de la tensión máxima admisible que vale 20000psi.

Se introducen estos datos en la ecuación para el espesor y se tiene:

$$t[\text{m}]=0,0027$$

En la **tabla A8.6 del anexo 8** se encuentra el espesor asociado al diámetro exterior, calculado en el punto 2, y el diámetro interior:

$t_{\text{tubería}}[\text{in}]$	0,11
$t_{\text{comercial}}[\text{in}]$	0,12
$D_i^{\text{comercial}}[\text{in}]$	12,4

6.2.6.6.-Velocidad real del fluido

Despejando la velocidad en la expresión de interés tendremos el valor de velocidad real que buscamos:

$v_{\text{real}}[\text{m/s}]$	0,513
-------------------------------	-------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Hasta aquí se han desarrollado los cálculos para el tramo nº 1, a continuación se exponen tablas resumen de los datos obtenidos para cada tramo:

Conducción nº	1
Tramo nº	1
$v_{supuesta}$ [m/s]	0,6
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,04
D_N [in]	12
D_o [mm]	323,8
$t_{aislante}$ [mm]	38
$D_o^{aislante}$ [mm]	399,8
$t_{tubería}$ [in]	0,11
$t_{comercial}$ [in]	0,12
D_i comercial [in]	12,4
v_{real} [m/s]	0,513

Conducción nº	1
Tramo nº	2
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,04
D_N [in]	8
D_o [mm]	219,1
$t_{aislante}$ [mm]	38
$D_o^{aislante}$ [mm]	295,1
$t_{tubería}$ [in]	0,155
$t_{comercial}$ [in]	0,16
D_i comercial [in]	8,3
v_{real} [m/s]	1,146

Conducción nº	2
Tramo nº	3
$v_{supuesta}$ [m/s]	9
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	1,452
D_N [in]	18
D_o [mm]	457
$t_{aislante}$ [mm]	38
$D_o^{aislante}$ [mm]	533
$t_{tubería}$ [in]	0,110
$t_{comercial}$ [in]	0,14
D_i comercial [in]	17,732
v_{real} [m/s]	9,112

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	2
Tramo nº	4
$v_{supuesta}$ [m/s]	9
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	1,4518
D_N [in]	18
D_o [mm]	457
$t_{aislante}$ [mm]	38
$D_o^{aislante}$ [mm]	533
$t_{tuberia}$ [in]	0,199
$t_{comercial}$ [in]	0,2
D_i comercial [in]	17,612
v_{real} [m/s]	9,237

Conducción nº	3
Tramo nº	5
$v_{supuesta}$ [m/s]	9
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	1,452
D_N [in]	18
D_o [mm]	457
$t_{aislante}$ [mm]	165
$D_o^{aislante}$ [mm]	787
$t_{tuberia}$ [in]	0,252
$t_{comercial}$ [in]	0,25
D_i comercial [in]	17,5
v_{real} [m/s]	9,356

Conducción nº	3
Tramo nº	6
$v_{supuesta}$ [m/s]	9
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	1,452
D_N [in]	18
D_o [mm]	457
$t_{aislante}$ [mm]	165
$D_o^{aislante}$ [mm]	787
$t_{tuberia}$ [in]	0,252
$t_{comercial}$ [in]	0,25
D_i comercial [in]	17,5
v_{real} [m/s]	9,356

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	3
Tramo nº	7
$v_{supuesta}$ [m/s]	9
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,726
D_N [in]	14
D_o [mm]	355,6
$t_{aislante}$ [mm]	165
$D_o^{aislante}$ [mm]	685,6
$t_{tuberia}$ [in]	0,232
$t_{comercial}$ [in]	0,24
D_i comercial [in]	12,814
v_{real} [m/s]	8,725

Conducción nº	3
Tramo nº	8
$v_{supuesta}$ [m/s]	9
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,726
D_N [in]	14
D_o [mm]	355,6
$t_{aislante}$ [mm]	165
$D_o^{aislante}$ [mm]	685,6
$t_{tuberia}$ [in]	0,232
$t_{comercial}$ [in]	0,24
D_i comercial [in]	12,814
v_{real} [m/s]	8,725

Conducción nº	4
Tramo nº	9
$v_{supuesta}$ [m/s]	0,6
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,04
D_N [in]	12
D_o [mm]	323,8
$t_{aislante}$ [mm]	38
$D_o^{aislante}$ [mm]	399,8
$t_{tuberia}$ [in]	0,107
$t_{comercial}$ [in]	0,12
D_i comercial [in]	12,4
v_{real} [m/s]	0,513

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	4
Tramo nº	10
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	0,04
D_N [in]	8
D_o [mm]	219,1
$t_{aislante}$ [mm]	152
$D_o^{aislante}$ [mm]	523,1
$t_{tubería}$ [in]	0,201
$t_{comercial}$ [in]	0,203
D_i comercial [in]	8,219
v_{real} [m/s]	1,169

Conducción nº	4
Tramo nº	11
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	0,02
D_N [in]	6
D_o [mm]	168,3
$t_{aislante}$ [mm]	152
$D_o^{aislante}$ [mm]	472,3
$t_{tubería}$ [in]	0,191
$t_{comercial}$ [in]	0,2
D_i comercial [in]	5,781
v_{real} [m/s]	1,181

Conducción nº	4
Tramo nº	12
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	0,02
D_N [in]	6
D_o [mm]	168,3
$t_{aislante}$ [mm]	152
$D_o^{aislante}$ [mm]	472,3
$t_{tubería}$ [in]	0,191
$t_{comercial}$ [in]	0,2
D_i comercial [in]	5,781
v_{real} [m/s]	1,181

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	5
Tramo nº	13
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,013
D_N [in]	8
D_o [mm]	219,1
$t_{aislante}$ [mm]	152
$D_o^{aislante}$ [mm]	523,1
$t_{tubería}$ [in]	0,201
$t_{comercial}$ [in]	0,203
D_i comercial [in]	6,813
v_{real} [m/s]	1,105

Conducción nº	5
Tramo nº	14
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,013
D_N [in]	8
D_o [mm]	219,1
$t_{aislante}$ [mm]	152
$D_o^{aislante}$ [mm]	523,1
$t_{tubería}$ [in]	0,201
$t_{comercial}$ [in]	0,203
D_i comercial [in]	6,813
v_{real} [m/s]	1,105

Conducción nº	5
Tramo nº	15
$v_{supuesta}$ [m/s]	0,6
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,026
D_N [in]	10
D_o [mm]	273
$t_{aislante}$ [mm]	165
$D_o^{aislante}$ [mm]	603
$t_{tubería}$ [in]	0,216
$t_{comercial}$ [in]	0,22
D_i comercial [in]	10,3
v_{real} [m/s]	0,484

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	5
Tramo nº	16
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,026
D_N [in]	8
D_o [mm]	219,1
$t_{aislante}$ [mm]	152
$D_o^{aislante}$ [mm]	523,1
$t_{tubería}$ [in]	0,201
$t_{comercial}$ [in]	0,203
D_i comercial [in]	6,813
v_{real} [m/s]	1,105

Conducción nº	6
Tramo nº	17
$v_{supuesta}$ [m/s]	0,3
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,024
D_N [in]	14
D_o [mm]	355,6
$t_{aislante}$ [mm]	38
$D_o^{aislante}$ [mm]	431,6
$t_{tubería}$ [in]	0,180
$t_{comercial}$ [in]	0,2
D_i comercial [in]	12,75
v_{real} [m/s]	0,291

Conducción nº	6
Tramo nº	18
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,024
D_N [in]	6
D_o [mm]	168,3
$t_{aislante}$ [mm]	38
$D_o^{aislante}$ [mm]	244,3
$t_{tubería}$ [in]	0,163
$t_{comercial}$ [in]	0,16
D_i comercial [in]	6,297
v_{real} [m/s]	1,195

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	6
Tramo nº	19
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,024
D_N [in]	6
D_o [mm]	168,3
$t_{aislante}$ [mm]	89
$D_o^{aislante}$ [mm]	346,3
$t_{tuberia}$ [in]	0,190
$t_{comercial}$ [in]	0,2
D_i comercial [in]	6,237
v_{real} [m/s]	1,218

Conducción nº	7
Tramo nº	20
$v_{supuesta}$ [m/s]	9
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,008
D_N [in]	1,25
D_o [mm]	42,2
$t_{aislante}$ [mm]	64
$D_o^{aislante}$ [mm]	170,2
$t_{tuberia}$ [in]	0,144
$t_{comercial}$ [in]	0,14
D_i comercial [in]	1,38
v_{real} [m/s]	8,270

Conducción nº	7
Tramo nº	21
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,008
D_N [in]	3,5
D_o [mm]	101,6
$t_{aislante}$ [mm]	64
$D_o^{aislante}$ [mm]	229,6
$t_{tuberia}$ [in]	0,160
$t_{comercial}$ [in]	0,16
D_i comercial [in]	3,624
v_{real} [m/s]	1,199

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	7
Tramo nº	22
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	0,008
D_N [in]	3,5
D_o [mm]	101,6
$t_{aislante}$ [mm]	64
$D_o^{aislante}$ [mm]	229,6
$t_{tubería}$ [in]	0,160
$t_{comercial}$ [in]	0,16
D_i comercial [in]	3,624
v_{real} [m/s]	1,199

Conducción nº	7
Tramo nº	23
$v_{supuesta}$ [m/s]	0,6
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	1,32E-04
D_N [in]	0,5
D_o [mm]	21,3
$t_{aislante}$ [mm]	51
$D_o^{aislante}$ [mm]	123,3
$t_{tubería}$ [in]	0,132
$t_{comercial}$ [in]	0,14
D_i comercial [in]	0,622
v_{real} [m/s]	0,672

Conducción nº	7
Tramo nº	24
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	1,32E-04
D_N [in]	0,5
D_o [mm]	21,3
$t_{aislante}$ [mm]	51
$D_o^{aislante}$ [mm]	123,3
$t_{tubería}$ [in]	0,132
$t_{comercial}$ [in]	0,14
D_i comercial [in]	0,546
v_{real} [m/s]	0,872

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	7
Tramo nº	25
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	7,85E-03
D_N [in]	3,5
D_o [mm]	101,6
$t_{aislante}$ [mm]	64
$D_o^{aislante}$ [mm]	229,6
$t_{tubería}$ [in]	0,160
$t_{comercial}$ [in]	0,16
D_i comercial [in]	3,624
v_{real} [m/s]	1,179

Conducción nº	8
Tramo nº	26
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	0,021
D_N [in]	6
D_o [mm]	168,3
$t_{aislante}$ [mm]	102
$D_o^{aislante}$ [mm]	372,3
$t_{tubería}$ [in]	0,197
$t_{comercial}$ [in]	0,22
D_i comercial [in]	6,187
v_{real} [m/s]	1,072

Conducción nº	8
Tramo nº	27
$v_{supuesta}$ [m/s]	15
$Q_{volumétrico}$ [m ³ /s]	0,219
D_N [in]	5
D_o [mm]	141,3
$t_{aislante}$ [mm]	152
$D_o^{aislante}$ [mm]	445,3
$t_{tubería}$ [in]	0,216
$t_{comercial}$ [in]	0,22
D_i comercial [in]	5,125
v_{real} [m/s]	16,455

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Conducción nº	8
Tramo nº	28
$v_{supuesta}$ [m/s]	1,2
$Q_{volumetrico}$ [m ³ /s]	0,010
D_N [in]	4
D_o [mm]	114,3
$t_{aislante}$ [mm]	127
$D_o^{aislante}$ [mm]	368,3
$t_{tuberia}$ [in]	0,196
$t_{comercial}$ [in]	0,22
$D_i^{comercial}$ [in]	4,662
v_{real} [m/s]	0,944

6.3.-Pérdidas de carga en tuberías

En este apartado del anexo se calculan las pérdidas de carga para cada tramo de tubería, esto será de utilidad para realizar más tarde el diseño de las bombas de impulsión necesarias en nuestro diseño.

La expresión utilizada para conocer las pérdidas de carga tanto en los tramos de tubería recta como en los accesorios de esta es la ecuación de Darcy:

$$h_f = (4f) \frac{L + L_{eq}}{D} \frac{v^2}{2g} \quad [A6.8]$$

Donde:

- h_f es la pérdida de carga total en metros
- L es la longitud de tramo recto en metros
- D es el diámetro interior de la tubería en metros
- v es la velocidad del fluido en m/s.
- g es la aceleración de la gravedad en m/s²
- $(4f)$ es el factor de fricción de Darcy.

Este factor se obtiene a partir del diagrama de Moody (**figura A8.1 del anexo 8**) en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa (ϵ/D), la cual se determina a su vez haciendo uso de la **figura A8.2 del anexo 8** a partir del diámetro y del material de la tubería.

- L_{eq} es la longitud equivalente en metros. La longitud equivalente de cada accesorio presente en la conducción se refiere a la longitud de la tubería recta de igual diámetro que el accesorio

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

que produciría una pérdida de carga igual a la del accesorio, de modo que se considera el accesorio como un tramo recto de tubería.

El valor de la longitud equivalente se encuentra en la tabla 30 y 31 del presente anexo. En el caso de que la tabla contenga valores de L_{eq}/D sólo debemos multiplicar por el diámetro de la conducción para conocer el valor de la longitud equivalente.

Pérdidas en codos y accesorios (longitud equivalente de tubería recta, en pies)														
Diámetro interior (in)	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Codo de 90°	2-2,5	4-5	6-7	9-10	10-11	12-14	18	27	26	31	35	40	45	52
Codo largo de 90°	1,5-2	2,5-4	5	6-7	7-8	9-11	12-14	16-17	20	23	27	30	34	40
Codo de 45°	1,5	2,5	3,5	4,5	6	7,5	10	12,5	15	17	19	21	23	28
Codo largo de 45°	1	1,5	2	2,7	3,5	4	5	6	7	9	10	12	14	16
Curva de 180°						36	46	60	75					
Curva de 180°, gran radio						20	25	30	40					
Curvas de 90° Soldadas														
0,5		7	10	12	15	19	25	32	38	44	50	56		
1		3	5	6	7	8	11	14	17	20	23	26		
1,5		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18		
2		1	2	3	3,5	4	6	8	10	12	14	16		
3		1	1,5	2,5	3	4	6	7	9	11	13	15		
Tes	5,5	10	15	20	25	32	41	55	65	75	85	100	115	130
V. de compuerta abierta	0,6	1,25	1,7	2,3	2,9	3,5	4,5	6	7	8	9	10	12	14
cerrada 1/4		7	10	13	16	19	26	33	40					
cerrada 1/2		33	50	70	85	100	130	160	190					
cerrada 3/4		140	200	280	340	400	540	700	800					
Válvula esférica	27	56	80	107	133	160	215	270	320	375	430	480	540	600
Válvula de retención	7	13	20	27	33	40	53	67	80	93	107	120	135	160
Válvula de pie	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28	32	36	40	48
Colador	4	5	6	8	10	11	13	16	18	21	24	30	35	40
Entrada típica	1,5	3	4,5	6	7,5	9	12	15	18	21	24	27	30	35

Tabla 2

Codos	K	L_{eq}/D
Codo de radio corto	0,9	32
Codo de radio medio	0,75	27
Codo de radio largo	0,60	20
Codo de 45°	0,42	15
Otros accesorios	K	L_{eq}/D
Válvula de globo, completamente abierta	10	350
Válvula de ángulo, completamente abierta	5	175
Válvula de compuerta		
- Completamente abierta	0,19	7
- entreabierta	2,06	72
Empalme en T normal	1,8	67

Tabla 3.-Pérdidas de carga en codos y accesorios (tabla complementaria)

→ DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS TUBERÍAS (ubicación en planta)

Para hacer una aproximación satisfactoria de la longitud de cada tramo de tubería que vamos a diseñar es necesario establecer primero la distancia que habrá entre cada uno de los equipos. Para ello vamos a hacer uso del artículo (Alejandro Anaya Durand, 1998).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

A continuación se exponen las consideraciones que se han tenido en cuenta para cada uno de los equipos:

✓ Horno: La regla general es que el equipo con fuego deberá ser localizado por lo menos 15 metros alejado de equipo de proceso peligroso o de equipo que pudiera ser fuente de salpicado o fuga de gases.

Los equipos de proceso (tales como reactores, fraccionadoras y columnas de destilación) que se encuentren conectados a la salida de los hornos, se deberán localizar tan cerca como sea posible, de manera que las líneas de transferencia sean lo más cortas y sencillas posible.

La distancia desde el horno a los equipos de proceso más cercano son: 6 a 10 metros para hornos circulares, de 12 a 18 m para hornos tipo caja. Los rack de tuberías podrán ser localizados dentro de estas distancias de seguridad; se deberá proveer un espacio libre entre horno y horno, estos espacios deberán ser dos veces su ancho (de centro a centro).

Así dejaremos una separación de 15 metros entre el horno y los reactores, y le daremos la elevación mínima de 1 metro desde el suelo.

✓ Reactores: dado que no hay reglamentación específica hemos combinado las normas para recipientes y torres. Los recipientes verticales grandes, al igual que las torres, deberán ser localizados de 2,5 a 3 diámetros alejados entre sí, de centro a centro.

Las elevaciones mínimas para recipientes y torres son de 0,9 a 1,5 metros desde el fondo al suelo.

Teniendo en cuenta las dimensiones de los reactores vamos a dejar una separación de 11 metros entre ellos, con una elevación de 1 metro desde el suelo.

✓ Torres: las líneas principales de proceso serán más cortas si las torres son arregladas en la secuencia de flujo de proceso y tan cercanas unas a otras como las dimensiones de equipo y espacio para acceso lo permitan. El lado anterior de las torres debería conservarse libre para tener acceso; el lado frontal deberá ser alineado manteniendo un claro entre ésta y el rack de tuberías.

La torre deberá situarse a 2,5-3 diámetros separada de los reactores y respetando al mismo tiempo la distancia al horno. Además la torre debe ser construida en tramos de 2,5 metros de altura para mantenimiento y tener una boca de hombre para acceso a unos 0,5-1,3 metros.

Así, teniendo en cuenta las dimensiones de la torre diseñada la situaremos a 10 m de los reactores y con una elevación de 1,5 metros del fondo al suelo.

✓ Intercambiadores: los intercambiadores agrupados deberán estar en fila con los ejes de las boquillas de las canales, en un plano vertical común, para presentar una apariencia estética y para facilitar los detalles de tubería. Los intercambiadores pueden apilarse, pero nunca deberán ser más de tres si se soportan mutuamente. Los intercambiadores conectados en serie o en paralelo pueden estar situados uno encima del otro hasta alturas de aproximadamente 4 metros.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

La mayoría de los intercambiadores están localizados con la base más o menos 1 metro arriba del nivel del piso. Los intercambiadores en batería a nivel de terreno suelen estar espaciados 0,9 metros entre ellos.

En la colocación de intercambiadores de calos se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

1º.-Los intercambiadores deberán estar inmediatos adyacentes a otros equipos como los rehervidores y deberán estar localizados cerca de sus respectivas torres, los condensadores deberán estar cerca de sus tanques de reflujo, y a la vez, cercanos a las torres.

2º.-Los intercambiadores, enfriadores de producto, por ejemplo, deberán ser colocados entre el equipo de proceso y el límite de batería de la unidad, con objeto de minimizar el recorrido de tuberías a altas temperaturas

En nuestro caso particular requieren especial atención el condensador y el calderín.

El condensador requiere soporte adecuado para el tanque de reflujo y requiere una cabeza adecuada en el centro de las columnas en caso de que hubiese más de una, se suelen situar a 4 metros de distancia de la torre.

El calderín suele estar localizado en la base a 1 metro sobre el nivel del piso y alejado 4 metros de la torre.

El intercambiador líquido-líquido de acondicionamiento de la alimentación lo situaremos a 4 metros de la columna, quedando situado entre ésta y los reactores.

✓ Bombas: normalmente las bombas se localizan tan cerca como sea posible y a nivel del piso de los recipientes de los que se succiona.

En la medida en que sea posible deberá evitarse que las bombas estén localizadas bajo el nivel del piso, ya que esto involucra trabajo civil costoso (por estructuras de soporte involucradas) y problemas de drenaje. Las bombas localizadas en puntos elevados generalmente causarán problemas de vibración en el diseño de estructuras.

Las bombas centrífugas de tipo lata requieren espacio en la parte frontal para remoción de la flecha y para mantenimiento del impulsor. En general el equipo mecánico deberá ser colocado de tal forma que su mantenimiento y operación no sea interferido por problemas de acceso.

✓ Rack de tuberías: la longitud del rack de tuberías es gobernada por el número y dimensiones del equipo, estructuras y edificios localizados a ambos lados del rack. Se requiere como promedio, alrededor de 3 m de longitud de rack por cada pieza de equipo para plantas petroquímicas. Así mismo, la altura del rack no deberá ser mayor de lo necesario para minimizar la longitud de las tuberías verticales.

➤ Preparación del plano de localización general: es fundamental seleccionar la escala adecuada. Los planos de localización de equipo deben ser dibujados en escala de ingeniería. Las escalas que se recomiendan utilizar para el plano de localización general son las siguientes:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Plano de localización general(maestro): 1=100 o 200
- Plano de localización general de equipo: 1=10 o 1=20 o 33 1/3 (área de proceso)
- Acotaciones de equipo e instalaciones:

·Las acotaciones para recipientes verticales, torres, calentadores, deben referirse a los centros.

·Las acotaciones para recipientes horizontales se refieren a los centros y a la línea tangente; también se ha de indicar la elevación a las líneas de centro.

·Las acotaciones para cambiadores de calor de coraza y tubos, se refieren a líneas de centro de la coraza a líneas de centro de la boquilla de los tubos; también se indica la elevación a líneas de centro.

·Las acotaciones para motor de compresores y cuadro de control son a centro de columnas.

·Las acotaciones para bombas son a líneas de centro de la boquilla de descarga.

·La soportería de tubería, también denominada rack, se acotará de manera que las columnas principales se indicarán con números y las columnas dentro de la planta se indicarán con letras.

6.3.1.-Desarrollo de los cálculos

6.3.1.1.-Cálculo del tramo 1

Se presentan los parámetros necesarios para determinar el Reynolds, así como el valor del mismo:

$v[m/s]$	0,513
$D_i[m]$	0,315
$\rho[kg/m^3]$	928
$\mu[kg/ms]$	6,40E-03
$Re[adim]$	2,34E+04

Con respecto a la rugosidad relativa, se debe tener en cuenta que la tubería está construida de acero inoxidable. Atendiendo a la **figura A8.2 del anexo 8**, para acero comercial se tiene:

$\epsilon/D[adim]$	0,00016
--------------------	---------

A partir del diagrama de Moody, en función del Reynolds y de la rugosidad relativa, se obtiene un factor de fricción de:

$(4f)[adim]$	0,02
--------------	------

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Por otro lado el valor de la longitud de tubería recta es de:

$L_{\text{tramo recto}} [\text{m}]$	1
-------------------------------------	---

Así, para estimar L_{eq} se consideran ahora los siguientes accesorios: una válvula de compuerta. Según la tabla 30 del presente anexo, la longitud equivalente de estos accesorios para el diámetro de la tubería en la que se encuentran es:

$L_{\text{eq}} [\text{m}]$	2,205
----------------------------	-------

Por último, sustituyendo estos datos en la ecuación de Darcy tendremos un valor de pérdida de carga de:

$h_f [\text{m}]$	0,0027
------------------	--------

6.3.1.2.-Resumen de cálculo de tramos

A continuación se recogen tablas resumen para cada uno de los tramos:

✓ **Cálculo del tramo nº1**

Conduce el fluido hasta la bomba de alimentación (BA).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

— 1 válvula de compuerta

Conducción nº	1
Tramo nº	1
$v [\text{m/s}]$	0,513
$D_i [\text{m}]$	0,315
$\rho [\text{kg/m}^3]$	928
$\mu [\text{kg/ms}]$	6,40E-03
$Re [\text{adim}]$	2,34E+04
$\epsilon/D [\text{adim}]$	0,00016
$(4f) [\text{adim}]$	0,02
$L_{\text{tramo recto}} [\text{m}]$	1
$L_{\text{eq}} [\text{m}]$	2,205
$h_f [\text{m}]$	0,0027

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº2**

Transporta el fluido desde la bomba (BA) hasta el horno de calentamiento (HC)

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 válvula de retención

Conducción nº	1
Tramo nº	2
$v[m/s]$	1,146
$D_i[m]$	0,211
$\rho[kg/m^3]$	928
$\mu[kg/ms]$	6,40E-03
$Re[adim]$	3,50E+04
$\varepsilon/D[adim]$	0,00025
$(4f)[adim]$	0,021
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	3
$L_{eq}[m]$	90,677
$h_f[m]$	0,6245

✓ **Cálculo del tramo nº3**

Conduce el hidrógeno hasta el compresor de alimentación (CA)

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de compuerta

Conducción nº	2
Tramo nº	3
$v[m/s]$	9,112
$D_i[m]$	0,450
$\rho[kg/m^3]$	0,084
$\mu[kg/ms]$	8,61E-06
$Re[adim]$	4,00E+04
$\varepsilon/D[adim]$	0,0001
$(4f)[adim]$	0,022
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	1
$L_{eq}[m]$	3,153
$h_f[m]$	0,8585

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº4**

Transporta el hidrógeno desde el compresor (CA) hasta el horno de calentamiento (HC).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

— 1 válvula de globo

Conducción nº	2
Tramo nº	4
$v[m/s]$	9,237
$D_i[m]$	0,447
$\rho[kg/m^3]$	0,835
$\mu[kg/ms]$	8,62E-06
$Re[adim]$	4,00E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,0001
$(4f)[adim]$	0,015
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	3
$L_{eq}[m]$	156,571
$h_f[m]$	23,2684

✓ **Cálculo del tramo nº5**

Conduce el hidrógeno desde el horno de calentamiento (HC) hasta el compresor de hidrógeno de reacción (CHR).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

— 1 válvula de seguridad

Conducción nº	3
Tramo nº	5
$v[m/s]$	9,356
$D_i[m]$	0,4445
$\rho[kg/m^3]$	0,413
$\mu[kg/ms]$	1,45E-05
$Re[adim]$	1,18E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00011
$(4f)[adim]$	0,0185
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	3
$L_{eq}[m]$	35,65
$h_f[m]$	7,1762

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº6**

Transporta el hidrógeno desde el compresor (CHR) hasta la T de bifurcación (T1), que divide la corriente en dos caudales idénticos, uno para cada uno de los reactores (RHDS)

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 T para bifurcación
- 3 codos de 90º

Conducción nº	3
Tramo nº	6
$v[m/s]$	9,356
$D_i[m]$	0,445
$\rho[kg/m^3]$	0,413
$\mu[kg/ms]$	1,45E-05
$Re[adim]$	1,18E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00011
$(4f)[adim]$	0,0185
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	30
$L_{eq}[m]$	221,361
$h_f[m]$	46,6708

✓ **Cálculo del tramo nº7**

Inyecta la corriente de hidrógeno en el primero de los reactores (RHDS1).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 codo de 90º

Conducción nº	3
Tramo nº	7
$v[m/s]$	8,725
$D_i[m]$	0,325
$\rho[kg/m^3]$	0,413
$\mu[kg/ms]$	1,45E-05
$Re[adim]$	8,07E+04
$\epsilon/D[adim]$	0,00014
$(4f)[adim]$	0,0195
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	11,5
$L_{eq}[m]$	122,704
$h_f[m]$	31,1949

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº8**

Alimenta de hidrógeno al segundo reactor de hidrógenodesulfuración (RHDS2).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 codo de 90º

Conducción nº	3
Tramo nº	8
$v[m/s]$	8,725
$D_i[m]$	0,325
$\rho[kg/m^3]$	0,413
$\mu[kg/ms]$	1,45E-05
$Re[adim]$	8,07E+04
$\epsilon/D[adim]$	0,00014
$(4f)[adim]$	0,0195
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	11,5
$L_{eq}[m]$	122,704
$h_f[m]$	31,1949

✓ **Cálculo del tramo nº9**

Conecta el horno (HC) con la bomba de impulsión de la alimentación en condiciones de operación (BAC).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de seguridad

Conducción nº	4
Tramo nº	9
$v[m/s]$	0,513
$D_i[m]$	0,315
$\rho[kg/m^3]$	795,98
$\mu[kg/ms]$	0,000333
$Re[adim]$	3,87E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00014
$(4f)[adim]$	0,0155
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	3
$L_{eq}[m]$	25,25
$h_f[m]$	0,0187

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº10**

Transporta el fluido desde la bomba (BAC) hasta la T de bifurcación de la corriente de gasóleo (T2).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 T para bifurcación
- 3 codos de 90º

Conducción nº	4
Tramo nº	10
$v[m/s]$	1,169
$D_i[m]$	0,209
$\rho[kg/m^3]$	795,98
$\mu[kg/ms]$	0,000333
$Re[adim]$	5,83E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00021
$(4f)[adim]$	0,016
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	34
$L_{eq}[m]$	103,964
$h_f[m]$	0,7360

✓ **Cálculo del tramo nº11**

Alimenta de gasóleo al reactor (RHDS1)

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 codo de 90º

Conducción nº	4
Tramo nº	11
$v[m/s]$	1,181
$D_i[m]$	0,147
$\rho[kg/m^3]$	795,98
$\mu[kg/ms]$	3,33E-04
$Re[adim]$	4,15E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00032
$(4f)[adim]$	0,0165
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	9,5
$L_{eq}[m]$	55,358
$h_f[m]$	0,5181

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº12**

Alimenta de gasóleo al reactor (RHDS2).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 codo de 90°

Conducción nº	4
Tramo nº	12
$v[m/s]$	1,181
$D_i[m]$	0,147
$\rho[kg/m^3]$	795,98
$\mu[kg/ms]$	3,33E-04
$Re[adim]$	4,15E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00032
$(4f)[adim]$	0,0165
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	9,5
$L_{eq}[m]$	55,358
$h_f[m]$	0,5181

✓ **Cálculo del tramo nº13**

Conduce el producto del reactor (HDS1) hasta el punto de mezcla (PM)

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 codo de 45°

Conducción nº	5
Tramo nº	13
$v[m/s]$	1,105
$D_i[m]$	0,173
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$\mu[kg/ms]$	2,72E-04
$Re[adim]$	4,39E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00026
$(4f)[adim]$	0,0165
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	11
$L_{eq}[m]$	63,163
$h_f[m]$	0,4404

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº14**

Conduce el producto del reactor (HDS2) hasta el punto de mezcla (PM).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 codo de 45°

Conducción nº	5
Tramo nº	14
$v[m/s]$	1,105
$D_i[m]$	0,173
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$\mu[kg/ms]$	2,72E-04
$Re[adim]$	4,39E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00026
$(4f)[adim]$	0,0165
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	11
$L_{eq}[m]$	63,163
$h_f[m]$	0,4404

✓ **Cálculo del tramo nº15**

Conecta el punto de mezcla con la bomba de alimentación de la unidad de aminas (BAUA).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 T para bifurcación
- 1 codo de 90°

Conducción nº	5
Tramo nº	15
$v[m/s]$	0,484
$D_i[m]$	0,262
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$\mu[kg/ms]$	2,72E-04
$Re[adim]$	2,90E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00017
$(4f)[adim]$	0,016
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	12
$L_{eq}[m]$	24,592
$h_f[m]$	0,0267

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº16**

Transporta la corriente de producto desde la bomba (BAUA) hasta la unidad de aminas (UA).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 bifurcación en Y

Conducción nº	5
Tramo nº	16
$v[m/s]$	1,105
$D_i[m]$	0,173
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$\mu[kg/ms]$	2,72E-04
$Re[adim]$	4,39E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00026
$(4f)[adim]$	0,0165
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	10
$L_{eq}[m]$	60,568
$h_f[m]$	0,4191

✓ **Cálculo del tramo nº17**

Conduce el líquido desde la unidad de aminas (UA) hasta la bomba de alimentación de la columna de destilación (BACD).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo

Conducción nº	6
Tramo nº	17
$v[m/s]$	0,291
$D_i[m]$	0,324
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$\mu[kg/ms]$	2,72E-04
$Re[adim]$	2,16E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00014
$(4f)[adim]$	0,0155
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	2
$L_{eq}[m]$	113,348
$h_f[m]$	0,0239

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº18**

Transporta el fluido desde la bomba (BACD) hasta el intercambiador de calor de acondicionamiento de la alimentación (ICA).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de globo
- 1 codo de 90º

Conducción nº	6
Tramo nº	18
$v[m/s]$	1,195
$D_i[m]$	0,160
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$\mu[kg/ms]$	2,72E-04
$Re[adim]$	4,38E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00029
$(4f)[adim]$	0,017
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	7,5
$L_{eq}[m]$	60,299
$h_f[m]$	0,5241

✓ **Cálculo del tramo nº19**

Conecta el intercambiador (ICA) con la columna de destilación (CD).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 codo de 90º
- 1 válvula de globo
- 1 placa de orificio
- 1 válvula de compuerta

Conducción nº	6
Tramo nº	19
$v[m/s]$	1,218
$D_i[m]$	0,158
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$\mu[kg/ms]$	2,72E-04
$Re[adim]$	4,42E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,0003
$(4f)[adim]$	0,017
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	9
$L_{eq}[m]$	60,833
$h_f[m]$	0,5662

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº20**

Conecta la columna de destilación (CD) con el condensador aéreo (AE).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 2 codos de 90°
- 1 placa de orificio
- 1 válvula de globo

Conducción nº	7
Tramo nº	20
$v[m/s]$	8,270
$D_i[m]$	0,035
$\rho[kg/m^3]$	31,03
$\mu[kg/ms]$	6,77E-05
$Re[adim]$	1,33E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,0014
$(4f)[adim]$	0,023
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	11,5
$L_{eq}[m]$	14,161
$h_f[m]$	58,6901

✓ **Cálculo del tramo nº21**

Enlaza el condensador (AE) con el acumulador de reflujo (DRF).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 codo de 90°

Conducción nº	7
Tramo nº	21
$v[m/s]$	1,199
$D_i[m]$	0,092
$\rho[kg/m^3]$	475,65
$\mu[kg/ms]$	9,04E-05
$Re[adim]$	5,81E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00045
$(4f)[adim]$	0,0175
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	1
$L_{eq}[m]$	2,485
$h_f[m]$	0,0486

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº22**

Lleva el líquido hasta el punto de bifurcación de destilado (TRF).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

— 1 T para bifurcación

Conducción nº	7
Tramo nº	22
$v[m/s]$	1,199
$D_i[m]$	0,092
$\rho[kg/m^3]$	475,65
$\mu[kg/ms]$	9,04E-05
$Re[adim]$	5,81E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00045
$(4f)[adim]$	0,0175
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	1
$L_{eq}[m]$	6,167
$h_f[m]$	0,0999

✓ **Cálculo del tramo nº23**

Conecta el caudal de destilado que se recircula a la columna con la bomba de reflujo (BRF).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

— 1 válvula de compuerta

Conducción nº	7
Tramo nº	23
$v[m/s]$	0,672
$D_i[m]$	0,016
$\rho[kg/m^3]$	475,65
$\mu[kg/ms]$	9,04E-05
$Re[adim]$	5,59E+04
$\epsilon/D[adim]$	0,0018
$(4f)[adim]$	0,024
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	2,5
$L_{eq}[m]$	0,111
$h_f[m]$	0,0912

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº24**

Conduce el reflujo desde la bomba (BRF) hasta la columna de destilación (CD).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 placa de orificio
- 1 válvula de globo
- 1 válvula de retención

Conducción nº	7
Tramo nº	24
$v[m/s]$	0,872
$D_i[m]$	0,014
$\rho[kg/m^3]$	475,65
$\mu[kg/ms]$	9,04E-05
$Re[adim]$	6,36E+04
$\epsilon/D[adim]$	0,0018
$(4f)[adim]$	0,025
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	2,5
$L_{eq}[m]$	5,924
$h_f[m]$	0,5881

✓ **Cálculo del tramo nº25**

Distribuye la otra parte del fluido que sale del acumulador de reflujo (DRF) hacia otras unidades de refinería que harán uso del butano obtenido, como las unidades de gases licuados del petróleo (GLP).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de compuerta
- 1 válvula de retención
- 1 válvula de globo

Conducción nº	7
Tramo nº	25
$v[m/s]$	1,179
$D_i[m]$	0,092
$\rho[kg/m^3]$	475,65
$\mu[kg/ms]$	9,04E-05
$Re[adim]$	5,71E+05
$\epsilon/D[adim]$	0,00045
$(4f)[adim]$	0,0175
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	3
$L_{eq}[m]$	40,212
$h_f[m]$	0,5824

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº26**

Transporta el líquido del fondo de la columna (CD) hacia el calderín (CV).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 codo de 90°
- 1 placa de orificio
- 1 válvula de globo

Conducción nº	8
Tramo nº	26
$v[m/s]$	1,072
$D_i[m]$	0,157
$\rho[kg/m^3]$	662,25
$\mu[kg/ms]$	3,58E-04
$Re[adim]$	3,11E+05
$\varepsilon/D[adim]$	0,00029
$(4f)[adim]$	0,016
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	9,5
$L_{eq}[m]$	59,245
$h_f[m]$	0,4102

✓ **Cálculo del tramo nº27**

Devuelve el vapor desde el calderín (CV) hacia la columna de destilación (CD).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 2 codos de 90°

Conducción nº	8
Tramo nº	27
$v[m/s]$	16,455
$D_i[m]$	0,130175
$\rho[kg/m^3]$	515,71
$\mu[kg/ms]$	1,43E-04
$Re[adim]$	7,71E+06
$\varepsilon/D[adim]$	0,00034
$(4f)[adim]$	0,016
$L_{\text{tramo recto}}[m]$	8
$L_{eq}[m]$	7,029
$h_f[m]$	25,4938

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ **Cálculo del tramo nº28**

Transporta el fondo de la columna (CD) hacia la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC).

Este tramo presenta los siguientes accesorios en tubería:

- 1 válvula de compuerta
- 1 válvula de retención
- 1 válvula de globo

Conducción nº	8
Tramo nº	28
$v[\text{m/s}]$	0,944
$D_i[\text{m}]$	0,118
$\rho[\text{kg/m}^3]$	515,71
$\mu[\text{kg/ms}]$	1,43E-04
$Re[\text{adim}]$	4,02E+05
$\epsilon/D[\text{adim}]$	0,00038
$(4f)[\text{adim}]$	0,0175
$L_{\text{tramo recto}}[\text{m}]$	3
$L_{eq}[\text{m}]$	51,741
$h_f[\text{m}]$	0,3677

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ANEXO7.-SISTEMAS DE IMPULSIÓN

7.1.-Introducción

Un sistema de impulsión consiste básicamente en captar fluido desde un determinado lugar y elevarlo o impulsarlo a otro punto, ubicado por lo general a un nivel más alto. Las corrientes líquidas que necesitan impulso disponen de un equipo auxiliar destinado a este uso, las bombas.

Es necesario por tanto, diseñar las diferentes líneas de bombeo de las que se compone el proceso. Éstas son un conjunto de tramos que comunican el equipo del que aspira el fluido con el equipo destinatario de éste. La composición del fluido es constante a lo largo de la línea de bombeo.

En el presente Proyecto se diferencian cinco líneas de bombeo:

En todas estas líneas se implantan dos bombas conectadas en bypass con el fin de combinar el uso de ambas y evitar pérdidas en el caso de que falle alguna de ellas. En cada línea se realiza solo el diseño para una de ellas puesto que se tratan de equipos idénticos.

7.2.-Diseño de líneas de bombeo de líquidos

7.2.1.-Línea 1: bomba de impulsión de la corriente de alimentación al horno

La bomba correspondiente a la primera línea de bombeo del sistema tiene como misión impulsar la corriente de alimentación desde el proceso anterior hasta el horno de alimentación.

7.2.1.1.-Selección del tipo de bomba

La elección del tipo de bomba adecuada depende de las condiciones de operación y de las características del fluido a impulsar. Existe una amplia gama dependiendo de las funciones que cumpla la bomba.

El método más sencillo para tomar una buena decisión es el método gráfico, donde a partir de un valor del caudal(Q_{vol}) y de la altura útil(H), que ha sido determinada en el apartado 2.1.2 de este anexo, se determina la bomba requerida en la siguiente gráfica:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

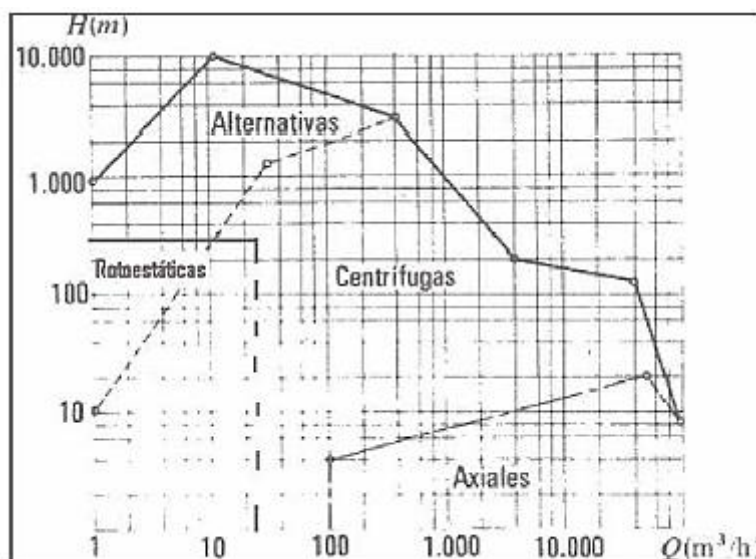


Figura 1.-Criterio de selección de sistemas de impulsión de líquidos

En este caso, la bomba cuenta con una altura útil de 114,74 m y un caudal de 144 m³/h por lo tanto, según la figura, la bomba requerida para el proceso es del tipo bomba centrífuga.

Las ventajas primordiales de las bombas centrífugas son la sencillez, el bajo costo inicial y de mantenimiento, el pequeño espacio necesario para su instalación y su capacidad de adaptación.

Se definen tres parámetros principales que ayudan a seleccionar la bomba:

- La carga útil de la bomba(H)
- La potencia(W)
- La altura neta de succión positiva disponible(NPSH_d)

7.2.1.2.-Determinación de la carga útil

Se define como la carga total que debe aportar la bomba para elevar el fluido hasta el punto de descarga venciendo desniveles, presiones y resistencias que surgen a lo largo del tramo de tubería.

Se desarrolla la ecuación de Bernoulli entre el punto de aspiración y el de descarga de la bomba:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_f \quad [A7.1]$$

Donde:

$\frac{P_2 - P_1}{\rho g}$, es la carga debida a la diferencia de presión entre el punto de aspiración y descarga

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

· $(Z_2 - Z_1)$, es carga de diferencia de altura

· $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$, es la carga debida a la diferencia de la velocidad

· h_f , es la carga debido a la fricción por la tubería entre ambos puntos

El punto de succión se encuentre situado al nivel del suelo y el punto de descarga a 5 metros de altura.

La carga por fricción de la línea es la suma de todos los tramos de los que está formada, por lo tanto el valor es:

hf[m]	1,897
-------	-------

Todos los demás datos son conocidos por lo que ya podemos determinar la carga útil:

nº de bomba	1
$Q_{vol}[m^3/s]$	0,04
$Q_{vol}[m^3/h]$	144
H[m]	114,739
$P_2[atm]$	10
$P_1[atm]$	1
$\rho[kg/m^3]$	862
$g[m/s^2]$	9,81
$z_2[m]$	5
$z_1[m]$	0
$v_2[m/s]$	0,513
$v_1[m/s]$	0,5
$h_f[m]$	1,897
Tipo de bomba	centrífuga

7.2.1.3.-Determinación de la potencia

La potencia hidráulica de la bomba es la precisada por esta exclusivamente para bombear el fluido hasta la altura útil.

Se define mediante la siguiente relación:

$$W = H \rho g Q_{vol} \quad [A7.2]$$

Siendo:

-W: la potencia hidráulica requerida

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

-H: la carga útil en metros

- ρ : la densidad de la corriente en kg/m^3

-g: la aceleración de la gravedad en m/s^2

- Q_{vol} : el caudal volumétrico de impulsión en m^3/s

Sustituyendo en la ecuación se obtiene un valor para la potencia de la bomba en cuestión de:

nº bomba	1
W[W]	38810,20
H[m]	114,74
$\rho[\text{kg/m}^3]$	862
$g[\text{m/s}^2]$	9,81
$Q_{\text{vol}}[\text{m}^3/\text{s}]$	0,04

7.2.1.4.-Altura neta de succión positiva disponible (NPSH_d)

La cavitación es el fenómeno por el cual la presión en la entrada de la bomba alcanza la presión de vapor del líquido bombeado a la temperatura de trabajo. El líquido hierve y forma burbujas, conforme estas burbujas se van moviendo del área de baja presión de la bomba hacia el área de alta presión el vapor regresa de nuevo a la fase líquida. Dicha condensación produce fuertes ondas de choque en el seno del líquido que, incluso, pueden llegar a desprender superficies sólidas circundantes creando cavidades. Con el paso del tiempo este fenómeno puede llegar a generar daños irreparables en el cuerpo de la bomba.

La cavitación se evita si la carga total media en la succión de la bomba, altura neta de succión positiva, es mayor que la carga de presión de vapor del fluido. NPSH_d se define como la carga total, medida en la succión de la bomba menos la presión de vapor del líquido:

$$NPSH_d = \frac{P_1 - P_v}{\rho g} + (z_1 - z_2) + \frac{v_1^2}{2g} - h_f \quad [\text{A7.3}]$$

Donde:

- P_a : es la presión en el punto de aspiración en Pascales.

- P_v : es la presión de vapor del fluido, obtenida mediante el simulador HYSYS.

- z_1 : es la altura del punto de aspiración en metros

- z_2 : es la altura de entrada de la bomba en metros

- v_1 : es la velocidad en el punto de aspiración en m/s.

- h_f : es la pérdida de carga entre el punto de aspiración y la entrada de la bomba.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Sustituyendo en la ecuación se tiene:

nº bomba	1
$P_1[\text{Pa}]$	101325
$\rho[\text{kg/m}^3]$	862
$g[\text{m/s}^2]$	9,81
$P_v[\text{Pa}]$	5434,33
$v_1[\text{m/s}]$	0,5
$z_2[\text{m}]$	0
$z_1[\text{m}]$	0
$h_f[\text{m}]$	0,0027
NPSH_d	12,57

7.2.1.5.-Altura neta de succión positiva requerida (NPSH_r)

Es la presión mínima que requiere la bomba para que no se produzca la cavitación y es proporcionado por el fabricante de la bomba.

El modelo comercial que se elige es de la casa Bell&Gossett de la serie 1510 modelo 4BC de 3500 rpm.

La curva característica del fabricante se presenta a continuación (véase el catálogo del distribuidor en el anexo de catálogos y fichas de seguridad del presente Proyecto Fin de Carrera) indica que la altura de succión requerida para el caudal de trabajo es igual a 4,9 m. Por lo tanto se garantiza el correcto funcionamiento de esta, evitando los problemas de cavitación, ya que su valor es menor que el de la carga neta de succión disponible:

$$\text{NPSH}_d = 12,57\text{m} > \text{NPSH}_r \approx 5\text{m}$$

7.2.2.-Línea 2: impulsión de la alimentación desde el horno hasta los reactores

La bomba correspondiente a la primera línea de bombeo del sistema tiene como misión impulsar la corriente de alimentación desde el proceso anterior hasta los reactores de hidrodesulfuración.

Siguiendo los pasos del cálculo que se vieron en el apartado 2.1 se obtienen los siguientes datos para esta línea de bombeo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.2.2.1.-Determinación de la carga útil

nº de bomba	2
$Q_{vol}[m^3/s]$	0,04
$Q_{vol}[m^3/h]$	144
$H[m]$	16,82
$P_2[atm]$	10
$P_1[atm]$	9
$\rho[kg/m^3]$	795,98
$g[m/s^2]$	9,81
$z_2[m]$	5
$z_1[m]$	3
$v_2[m/s]$	1,18
$v_1[m/s]$	0,513
$h_f[m]$	1,7909
Tipo de bomba	centrífuga

7.2.2.2.-Determinación de la potencia

nº bomba	2
$W[W]$	5255,04
$H[m]$	16,82
$\rho[kg/m^3]$	795,98
$g[m/s^2]$	9,81
$Q_{vol}[m^3/s]$	0,04

7.2.2.3.-Altura neta de succión positiva disponible

nº bomba	2
$P_1[Pa]$	911925
$\rho[kg/m^3]$	795,98
$g[m/s^2]$	9,81
$P_v[Pa]$	620225,91
$v_1[m/s]$	0,513
$z_2[m]$	5
$z_1[m]$	3
$h_f[m]$	0,0187
$NPSH_d$	36,67

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.2.2.4.-Altura neta de succión positiva requerida

Es la presión mínima que requiere la bomba para que no se produzca la cavitación y es proporcionado por el fabricante de la bomba.

El modelo comercial que se elige es el modelo 3171 desarrollado por la casa Goulds Pumps de tamaño 3x4x11. Esta bomba funciona con un motor de 1750 rpm.

La curva característica del fabricante se presenta a continuación (véase el catálogo del distribuidor en el anexo 8 del presente Proyecto Fin de Carrera) indica que la altura de succión requerida para el caudal de trabajo es igual a 5 m. Por lo tanto se garantiza el correcto funcionamiento de esta, evitando los problemas de cavitación, ya que su valor es menor que el de la carga neta de succión disponible:

$$NPSH_d = 36,67 \text{ m} > NPSH_r \approx 5 \text{ m}$$

7.2.3.-Línea 3: impulsión del fluido desde la salida de los reactores hasta la unidad de aminas

La bomba correspondiente a la primera línea de bombeo del sistema tiene como misión impulsar la corriente de producto de los reactores hasta la unidad de aminas.

Siguiendo los pasos del cálculo que se vieron en el apartado 2.1 se obtienen los siguientes datos para esta línea de bombeo.

7.2.3.1.-Determinación de la carga útil

nº de bomba	3
$Q_{vol} [m^3/s]$	0,026
$Q_{vol} [m^3/h]$	93,6
$H [m]$	3,38
$P_2 [atm]$	10
$P_1 [atm]$	10
$\rho [kg/m^3]$	477,1
$g [m/s^2]$	9,81
$z_2 [m]$	2
$z_1 [m]$	0
$v_2 [m/s]$	1,105
$v_1 [m/s]$	0,484
$h_f [m]$	1,3266
Tipo de bomba	centrífuga

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.2.3.2.-Determinación de la potencia

nº bomba	3
W[W]	410,93
H[m]	3,38
ρ [kg/m ³]	477,1
g[m/s ²]	9,81
Q _{vol} [m ³ /s]	0,026

7.2.3.3.-Altura neta de succión positiva disponible

nº bomba	3
P ₁ [Pa]	1013250
ρ [kg/m ³]	477,1
g[m/s ²]	9,81
P _v [Pa]	949787,42
v ₁ [m/s]	0,484
z ₂ [m]	2
z ₁ [m]	0
h _f [m]	0,9075
NPSH _d	13,62

7.2.3.4.-Altura neta de succión positiva requerida

Es la presión mínima que requiere la bomba para que no se produzca la cavitación y es proporcionado por el fabricante de la bomba.

El modelo comercial que se elige es de la casa Bell&Gossett de la serie 1510 modelo 4AC de 1750 rpm.

La curva característica del fabricante se presenta a continuación (véase el catálogo del distribuidor en el anexo de catálogos y fichas de seguridad del presente Proyecto Fin de Carrera) indica que la altura de succión requerida para el caudal de trabajo es igual a 5 m. Por lo tanto se garantiza el correcto funcionamiento de esta, evitando los problemas de cavitación, ya que su valor es menor que el de la carga neta de succión disponible:

$$\text{NPSH}_d = 13,61 \text{ m} > \text{NPSH}_r \approx 3,3 \text{ m}$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.2.4.-Línea 4: impulsión de la corriente de producto al plato de alimentación de la columna de destilación.

La bomba correspondiente a la primera línea de bombeo del sistema tiene como misión impulsar la corriente de alimentación desde el proceso anterior hasta la columna de destilación.

Siguiendo los pasos del cálculo que se vieron en el apartado 2.1 se obtienen los siguientes datos para esta línea de bombeo.

7.2.4.1.-Determinación de la carga útil

nº de bomba	4
$Q_{vol}[m^3/s]$	0,024
$Q_{vol}[m^3/h]$	86,4
$H[m]$	213,65
$P_2[atm]$	14,07
$P_1[atm]$	2
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$g[m/s^2]$	9,81
$z_2[m]$	12
$z_1[m]$	1,5
$v_2[m/s]$	1,218
$v_1[m/s]$	0,291
$h_f[m]$	3,299
Tipo de bomba	centrífuga

7.2.4.2.-Determinación de la potencia

nº bomba	4
$W[W]$	31398,80
$H[m]$	213,65
$\rho[kg/m^3]$	624,2
$g[m/s^2]$	9,81
$Q_{vol}[m^3/s]$	0,024

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.2.4.3.-Altura neta de succión positiva disponible

nº bomba	4
$P_1[\text{Pa}]$	202650
$\rho[\text{kg/m}^3]$	624,2
$g[\text{m/s}^2]$	9,81
$P_v[\text{Pa}]$	122591,03
$v_1[\text{m/s}]$	0,291
$z_2[\text{m}]$	0
$z_1[\text{m}]$	0
$h_f[\text{m}]$	0,0239
NPSH_d	13,51

7.2.4.4.-Altura neta de succión positiva requerida

Es la presión mínima que requiere la bomba para que no se produzca la cavitación y es proporcionado por el fabricante de la bomba.

El modelo comercial que se elige es el modelo 3171 desarrollado por la casa Goulds Pumps de tamaño 3x4x11. Esta bomba funciona con un motor de 1750 rpm.

La curva característica del fabricante se presenta a continuación (véase el catálogo del distribuidor en el anexo de catálogos y fichas de seguridad del presente Proyecto Fin de Carrera) indica que la altura de succión requerida para el caudal de trabajo es igual a 5 m. Por lo tanto se garantiza el correcto funcionamiento de esta, evitando los problemas de cavitación, ya que su valor es menor que el de la carga neta de succión disponible:

$$\text{NPSH}_d = 13,51 \text{ m} > \text{NPSH}_r \approx 2,8 \text{ m}$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.2.5.-Línea 2: impulsión de la alimentación del reflujo de la columna

La bomba correspondiente a esta línea de impulsión tiene como misión impulsar la corriente de reflujo desde la salida del acumulador de reflujo hasta el plato correspondiente de la columna de destilación. Siguiendo los pasos del cálculo que se vieron en el apartado 2.1 se obtienen los siguientes datos para esta línea de bombeo.

7.2.5.1.-Determinación de la carga útil

nº de bomba	5
$Q_{vol}[m^3/s]$	0,000132
$Q_{vol}[m^3/h]$	0,4752
H[m]	61,75
$P_2[atm]$	14,07
$P_1[atm]$	14,07
$\rho[kg/m^3]$	475,6
$g[m/s^2]$	9,81
$z_2[m]$	18,2
$z_1[m]$	16
$v_2[m/s]$	0,872
$v_1[m/s]$	0,672
$h_f[m]$	59,536
Tipo de bomba	centrífuga

7.2.5.2.-Determinación de la potencia

nº bomba	5
W[W]	38,03
H[m]	61,75
$\rho[kg/m^3]$	475,6
$g[m/s^2]$	9,81
$Q_{vol}[m^3/s]$	0,000132

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.2.5.3.-Altura neta de succión positiva disponible

nº bomba	5
$P_1[\text{Pa}]$	1426000
$\rho[\text{kg/m}^3]$	475,6
$g[\text{m/s}^2]$	9,81
$P_v[\text{Pa}]$	1424742,97
$v_1[\text{m/s}]$	0,672
$z_2[\text{m}]$	16
$z_1[\text{m}]$	18,2
$h_f[\text{m}]$	58,95
NPSH_d	63,63

7.2.5.4.-Altura neta de succión positiva requerida

Es la presión mínima que requiere la bomba para que no se produzca la cavitación y es proporcionado por el fabricante de la bomba.

El modelo comercial que se elige es de la casa Bell&Gossett de la serie 1510 modelo 4AC de 1750 rpm.

La curva característica del fabricante se presenta a continuación (véase el catálogo del distribuidor en el anexo de catálogos y fichas de seguridad del presente Proyecto Fin de Carrera) indica que la altura de succión requerida para el caudal de trabajo es igual a 5 m. Por lo tanto se garantiza el correcto funcionamiento de esta, evitando los problemas de cavitación, ya que su valor es menor que el de la carga neta de succión disponible:

$$\text{NPSH}_d = 63,63 \text{ m} > \text{NPSH}_r \approx 3,3 \text{ m}$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.3.-Diseño de líneas de impulsión de gases

Así como los fluidos incompresibles, líquidos, se impulsan mediante el uso de bombas, los fluidos compresibles, gases, lo hacen mediante el uso de compresores. Por ello para diseñar los sistemas de impulsión de gases, hidrógeno en estado gaseoso para el caso que nos ocupa debemos recurrir a las ecuaciones que gobiernan el diseño de compresores.

7.3.1.-Criterios de selección de ventiladores, soplantes y compresores

Los criterios para la selección del tipo de aparato más adecuado para la impulsión de gases son, en principio, los mismos que para la selección del tipo de bomba. Se han de tener en cuenta, por un lado, las propiedades del gas y por otro, las condiciones de la impulsión. En principio, el primer factor a considerar es la presión de descarga que se ha de alcanzar, o mejor dicho, el salto de presión requerido. Ello determina la selección entre los tres grandes tipos de aparatos (ventiladores, soplantes y compresores).

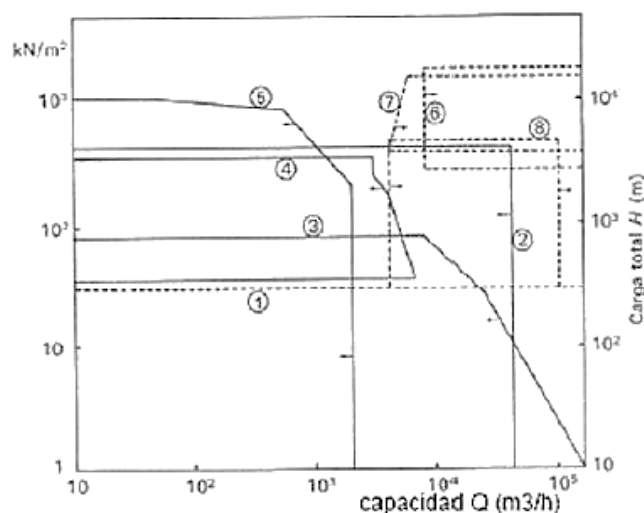


FIG. 8-43. Gráfica comparativa de los diversos tipos de ventiladores, soplantes y compresores: Ventiladores 1; Soplantes de desplazamiento positivo: de tornillo 2; de lóbulos rectos 3; de paletas 4; Compresores: alternativos de un cilindro 5; axiales de múltiples etapas 6; centrífugos de múltiples etapas 7; centrífugos de una sola etapa 8.

Figura 2.-Criterio de selección de sistemas de impulsión de gases

7.3.2.-Ecuación de diseño para compresores

Tenemos diferentes ecuaciones de diseño según sean las condiciones de compresión, así tendremos compresión isotérmica, compresión adiabática y compresión politrópica, siendo esta última un término medio entre las anteriores.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.3.2.1.-Compresión isotérmica

Cuando el enfriamiento durante la compresión es tal que la temperatura se mantiene constante, el proceso es isotérmico.

$$h_A = \frac{P_1}{\rho_1 g} \ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{RT}{Mg} \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [A7.4]$$

7.3.2.2.-Compresión adiabática

En los aparatos no refrigerados, el fluido sigue una compresión adiabática y la expresión que encontramos en la bibliografía es la siguiente:

$$h_A = \frac{RT_1}{Mg} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad [A7.5]$$

Donde:

h_A : carga del compresor

R: constante de los gases ideales

M: peso molecular del gas

γ : coeficiente de dilatación adiabática

P_2 : presión de salida del compresor

P_1 : presión de entrada del compresor

➤ Si comparamos con la compresión isotérmica se puede comprobar que h_A isotérmica < h_A adiabática. Por lo que los compresores operando en forma isotérmica son más eficaces y necesitan menos energía para conseguir el mismo aumento de presión.

7.3.2.3.-Compresión politrópica

Como ya comentamos, en los compresores de gran tamaño, el proceso es intermedio entre adiabático e isotérmico, es decir, se realizan compresiones politrópicas. Esto es así, porque al ser el trabajo de compresión isotérmico menor que el adiabático, interesa trabajar en régimen isotérmico. Por ello, la compresión se efectúa procurando que se pierda el calor desarrollado en la compresión, para lo cual se rodea al cilindro compresor de un líquido refrigerante en circulación. No obstante, es imposible evitar cierto calentamiento del gas ya

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

que, cuando se desean altos niveles de compresión del gas, el calor generado es muy elevado y tanto la superficie como el tiempo para el intercambio de calor pequeños.

Debido a esto, cuando se desean alcanzar altas presiones, los compresores se fraccionan de forma que trabajen en varias etapas sucesivas. De manera que el proceso total de compresión es isotérmico pero cada una de las etapas de compresión opera en régimen adiabático.

En los procesos politrópicos, el trabajo de compresión realizado en cada cilindro viene dado por la expresión que obtuvimos para un proceso adiabático:

$$h_{AC_i} = \frac{RT_i}{Mg} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad [A7.6]$$

Donde:

T_i : Temperatura de entrada al compresor C_i

P_i : Presión de entrada al compresor C_i

P_{i+1} : Presión de salida del compresor C_i

P_{i+1}/P_i : razón de compresión en el compresor C_i

De este modo el trabajo total de compresión vendrá dado por:

$$h_A = \sum h_{AC_i} \quad [A7.7]$$

Si se tienen N cilindros, y teniendo en cuenta que en todos los cilindros la razón de compresión es la misma:

$$\frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{P_{i+2}}{P_{i+1}} = \frac{P_{i+3}}{P_{i+2}} = \dots = \frac{P_N}{P_{N-1}} = \frac{P_{N+1}}{P_N} \quad [A7.8]$$

Y teniendo en cuenta que la temperatura de entrada del gas en cada cilindro es la misma $T_i = \text{cte} = T$, se tiene que:

$$h_A = N h_{AC_i} = \frac{NRT_i}{Mg} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad [A7.9]$$

Así, la razón total de compresión en estos casos será:

$$\frac{P_{N+1}}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \frac{P_3}{P_2} \dots \frac{P_N}{P_{N-1}} \frac{P_{N+1}}{P_N} = \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^N \quad [A7.10]$$

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

7.3.3.-Desarrollo de los cálculos para el diseño de compresores

En nuestro diseño encontramos dos líneas que requieren del uso de compresores o dos líneas de compresión.

7.3.3.1.-Línea 1: impulsión de la corriente de hidrógeno desde etapas anteriores de proceso hasta el horno calefactor.

Teniendo en cuenta las condiciones de operación, que son las del tramo de tubería nº 3, nos disponemos a calcular el valor de la carga del compresor, para lo cual emplearemos la expresión de compresores adiabáticos anteriormente desarrollada pues aún no conocemos el número de compresores implicados.

En la siguiente tabla se recogen los valores de las variables así como el de la carga calculada:

P_1 [atm]	1
P_1 [Pa]	101325
P_2 [atm]	10
P_2 [Pa]	1013250
T [°C]	20
T [K]	293,15
Q [m ³ /s]	1,458
W [kg/s]	0,2985
M [kg/mol]	2,02E-03
γ [adim]	1,414
g [m/s ²]	9,81
R [J/molK]	8,314
h_A [m]	405081,9

Una vez conocemos h_A nos disponemos a determinar el valor de la potencia mecánica requerida para lo que hacemos uso de la siguiente expresión:

$$Pot_{mec} = Wgh_A \quad [A7.11]$$

Donde:

Pot_{mec} : potencia mecánica en Watios

g : gravedad

h_A : carga en metros

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Puesto que todos los datos son ya conocidos sólo tenemos que sustituir en la expresión para conocer la potencia mecánica requerida:

Pot _{mec} [W]	1186195
Pot _{mec} [kW]	1186,20

El modelo comercial seleccionado según nuestras necesidades es el modelo ZH: compresores centrífugos exentos de aceite, 500-2750 kW/600-3500 CV, de la casa Atlas Copco cuyo catálogo encontramos en el anexo de catálogos y fichas de seguridad.

Siendo por tanto el rendimiento mecánico el cociente entre la potencia requerida y la potencia real:

Pot _{mec} [kW]	1186,20
Pot _{real} [kW]	1250,00
η	94,90%

Este compresor comercial consta de dos etapas y por tanto podemos determinar la razón de compresión total, así como la individual:

Razón total	10
Razón individual	3,16

7.3.3.2.-Línea 2: impulsión de la corriente de hidrógeno caliente desde el horno hasta los reactores de hidrodesulfuración.

Teniendo en cuenta las condiciones de operación, que son las del tramo de tubería nº 5, nos disponemos a calcular el valor de la carga del compresor, para lo cual emplearemos la expresión de compresores adiabáticos anteriormente desarrollada pues aún no conocemos el número de compresores implicados.

En la siguiente tabla se recogen los valores de las variables así como el de la carga calculada:

P ₁ [atm]	9
P ₁ [Pa]	911925
P ₂ [atm]	10
P ₂ [Pa]	1013250
T[°C]	320
T[K]	593,15
Q[m ³ /s]	1,458
W[kg/s]	0,2985
M[kg/mol]	0,002016
Y[adim]	1,414
g[m/s ²]	9,81
R[J/molK]	8,314
h _A [m]	26681,41

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Una vez conocemos h_A nos disponemos a determinar el valor de la potencia mecánica requerida para lo que hacemos uso de la siguiente expresión:

$$Pot_{mec} = Wgh_A \quad [A7.12]$$

Donde:

Pot_{mec} : potencia mecánica en watios

g : gravedad

h_A : carga en metros

Puesto que todos los datos son ya conocidos sólo tenemos que sustituir en la expresión para conocer la potencia mecánica requerida:

$Pot_{mec}[W]$	78130,76
$Pot_{mec}[kW]$	78,13

El modelo comercial seleccionado según nuestras necesidades es el modelo P: compresores de pistón exentos de aceite, 37-275 kW/50-368 CV, de la casa Atlas Copco cuyo catálogo encontramos en el anexo de catálogos y fichas de seguridad.

Siendo por tanto el rendimiento mecánico el cociente entre la potencia requerida y la potencia real:

$Pot_{mec}[kW]$	78,13
$Pot_{real}[kW]$	100,00
η	78,13%

Este compresor comercial consta de tres etapas y por tanto podemos determinar la razón de compresión total, así como la individual:

Razón total	1,1
Razón individual	1,04

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ANEXO 8.-FIGURAS Y TABLAS

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1]

BASIC ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS ¹										
Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated										
Material	Spec. No.	P-No. or S-No. (5)	Grade	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi		Min. Temp. to 100 200 300		
						Tensile	Yield			
Carbon Steel										
Pipes and Tubes (2)										
A 285 Gr. A	A 134	1	...	(8b)(57)	| B	45	24	15.0	14.6	14.2
A 285 Gr. A	A 672	1	A45	(57)(59)(67)	| B	45	24	15.0	14.6	14.2
Butt weld	API 5L	S-1	A25	(8a)	|| -20	45	25	15.0	15.0	14.5
Seams & ERW	API 5L	S-1	A25	(57)(59)	| B	45	25	15.0	15.0	14.5
...	A 179	1	...	(57)(59)	-20	47	26	15.7	15.0	14.2
Type F	A 53	1	Gr. A	(8a)(77)	|| 20	48	30	16.0	16.0	16.0
...	A 139	S-1	A	(8b)(77)	| A	48	30	16.0	16.0	16.0
...	A 287	1	...	(57)(59)	-20	48	30	16.0	16.0	16.0
...	A 53	1	A	(57)(59)	}	B	30	16.0	16.0	16.0
...	A 106	1	A	(57)						
...	A 135	1	A	(57)(59)						
...	A 369	1	FPA	(57)						
...	API 5L	S-1	A	(57)(59)(77)						
A 285 Gr. B	A 134	1	...	(8b)(57)	| B	50	27	16.7	16.4	16.0
A 285 Gr. B	A 672	1	A50	(57)(59)(67)	| B	50	27	16.7	16.4	16.0
A 285 Gr. C	A 134	1	...	(8b)(57)	| A	55	30	18.3	18.3	17.7
...	A 524	1	Gr. II	(57)	-20	55	30	18.3	18.3	17.7
...	A 333	1	1	}	-50	55	30	18.3	18.3	17.7
...	A 334	1	1							
A 285 Gr. C	A 671	1	CA55	(59)(67)	}	A				
A 285 Gr. C	A 672	1	A55	(57)(59)(67)						
A 516 Gr. 55	A 672	1	C55	(57)(67)	}	C	55	18.3	18.3	17.7
A 516 Gr. 60	A 671	1	CC60	(57)(67)						
A 515 Gr. 60	A 671	1	CB60	}	}	B	60	20.0	19.5	18.9
A 515 Gr. 60	A 672	1	BC60							
A 516 Gr. 60	A 672	1	C60	(57)(67)	}	C	60	20.0	19.5	18.9
...	A 139	S-1	B	(8b)	| A	60	35	20.0	20.0	20.0

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)

BASIC ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS ¹										
Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated										
Material	Spec. No.	P-No. or S-No. (5)	Grade	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi		Min. Temp. to 100 200 300		
						Tensile	Yield			
Carbon Steel (Cont'd)										
Pipes and Tubes (2) (Cont'd)										
...	API 5L	S-1	X60	(51)(55)(71)(77)	A	75	60	25.0	25.0	25.0
...	API 5L	S-1	X65	(51)(55)(71)	A	77	65	25.7	25.7	25.7
...	API 5L	S-1	X70	(51)(55)(71)	A	82	70	27.3	27.3	27.3
...	API 5L	S-1	X80	(51)(55)(71)	A	90	80	30.0	30.0	30.0
...	A 381	S-1	Y60	(51)(71)	A	75	60	25.0	25.0	25.0
Pipes (Structural Grades) (2)										
A 283 Gr. A	A 134	1	...	(8a)(8c)	-10	45	24	13.7	13.0	12.4
A 573 Gr. 30	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	49	30	15.0	13.0	12.0
A 283 Gr. B	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	50	27	15.3	14.4	13.9
A 573 Gr. 33	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	52	33	15.9	13.9	12.9
A 573 Gr. 36	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	53	36	16.3	16.3	16.3
A 573 Gr. 40	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	55	40	16.9	16.9	16.9
A 36	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	58	36	17.6	16.8	16.8
A 283 Gr. D	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	60	53	18.4	17.4	16.6
A 573 Gr. 45	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	60	45	18.4	18.4	18.4
A 573 Gr. 50	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	65	50	19.9	19.9	19.9
Plates and Sheets										
...	A 285	1	A	(57)(59)	B	45	24	15.0	14.6	14.2
...	A 285	1	B	(57)(59)	B	50	27	16.7	16.4	16.0
...	A 516	1	55	(57)	C	55	39	18.3	18.3	17.7
...	A 285	1	C	(57)(59)	A	55	36	18.3	18.3	17.7
...	A 516	1	60	(57)	C	60	32	20.0	19.3	18.9
...	A 515	1	40	(57)	B	60	31	20.0	19.5	18.9
...	A 516	1	65	(57)	B	65	35	21.7	21.3	20.7
...	A 515	1	65	(57)	A	65	35	21.7	21.3	20.7
...	A 516	1	70	(57)	B	70	38	23.3	23.1	22.5
...	A 515	1	70	(57)	A	70	38	23.3	23.1	22.5
1/2 to 1/2 in. thick	A 537	1	Cl. 1	...	D	70	50	23.3	23.3	22.9
6 to 1 in. thick	A 299	1	...	(57)	A	75	40	25.0	24.4	23.7
1/2 to 1 in. thick	A 299	1	...	(57)	A	75	42	25.0	25.0	24.8

(continued)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías
[ASME B31.1] (Continuación)

TABLE A-1 (CONT'D)														
BASIC ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS ¹														
Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated														
Basic Allowable Stress S, ksi (1), at Metal Temperature, °F (7)														
400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	Grade	Spec. No.
														Carbon Steel Pipe and Tubes (2)
13.7	13.0	11.8	11.6	11.5	10.3	9.0	7.8	6.5	...	...	...	...	...	A 134
13.7	13.0	11.8	11.6	11.5	10.3	9.0	7.8	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A45	A 672
13.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A25	API 5L
13.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A25	API 5L
13.5	12.8	12.1	11.8	11.5	10.6	9.2	7.9	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	...	A 179
16.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	Gr. A	A 53
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A	A 139
16.0	16.0	14.8	14.5	14.4	10.7	9.3	7.9	...	...	...	...	...	...	A 587
16.0	16.0	14.8	14.5	14.4	10.7	9.3	7.9	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A A FFA A	A 53
														A 106
														A 135
														A 369
														API 5L
15.4	14.6	13.3	13.1	13.0	11.2	9.6	8.1	6.5	...	...	...	...	...	A 134
15.4	14.6	13.3	13.1	13.0	11.2	9.6	8.1	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A 50	A 672
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	...	...	...	...	...	A 134
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	4.5	2.5	...	...	Gr. II	A 524
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	I	A 333
													I	A 334
													CA55	A 671
													A55	A 672
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.1	10.2	8.4	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	C55	A 672
18.3	17.3	15.8	15.5	15.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	...	...	CD60	A 671
													CB40	A 671
18.3	17.3	15.8	15.5	15.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	B60	A 672
													CB0	A 672

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)

Material	Spec. No.	P-No. or S-No. ISO	Grade	Notes	Min. Temp., °F (°C)	Specified Min. Strength, ksi		Min. Temp., °F (°C)						
						Tensile	Yield	100	200	300	400	500	600	
Stainless Steel (310) (A1) Pipes and Tubes (2)														
18Cr-10Ni-Ti pipe wall $\leq \frac{1}{8}$ in. thick	A 332	8	TP321	150C361	-425	70	25	16.7	16.7	16.7	16.7	16.1	15.2	
18Cr-10Ni-Ti pipe wall $> \frac{1}{8}$ in. thick	A 336													
18Cr-10Ni tube	A 269	8	TP304L	150C361	-425	70	25	16.7	16.7	16.7	15.8	14.8	14.0	
18Cr-10Ni plate	A 312	8	TP304L	150C361	-425									
Type 304L A 240	A 350	8	304L	150C361	-425									
16Cr-12Ni-2Mo tube	A 269	8	TP316L	150C361	-425	70	25	16.7	16.7	16.7	15.5	14.4	13.5	
16Cr-12Ni-2Mo plate	A 312	8	TP316L	150C361	-425									
Type 316L A 240	A 350	8	316L	150C361	-425									
18Cr-10Ni-Ti pipe wall $\leq \frac{1}{8}$ in. thick	A 312	8	TP321	150C361	-425	70	25	16.7	16.7	16.7	16.1	15.2		
18Cr-10Ni-Ti plate wall $\leq \frac{1}{8}$ in. thick	A 336													
18Cr-10Ni-Ti plate wall $> \frac{1}{8}$ in. thick	A 312	8	TP321H	150C361	-325	70	25	16.7	16.7	16.7	16.1	15.2		
18Cr-10Ni-Ti pipe wall $> \frac{1}{8}$ in. thick	A 374	8	TP321H	150C361	-325									
23Cr-13Ni	A 453	8	CPH8	150C361	-325	85	28	18.7	18.7	18.7	18.7	18.0	18.0	
23Cr-13Ni	A 453	8	CPH20	150C361	-325	85	28	18.7	18.7	18.7	18.7	18.0	18.0	
31Cr-11Ni tube	A 266	7	TP408	150C361	-20	60	30	20.0	...	...	...	...	...
31Cr-11Ni plate	A 266	7	TP409	150C361	-20	60	30	20.0	...	...	...	...	...
31Cr-11Ni-2Mo-Cu	A 453	8	CPH10MC	150C361	-325	70	30	20.0	...	...	...	...	...
31Cr-11Ni-2Mo plate	A 276	8	16-6-22	150C361	-325	70	30	20.0	...	...	...	...	...
32Cr-11Ni tube	A 266	7	TP405	150C361	-20	60	30	20.0	18.4	17.7	17.4	17.2	16.8	
32Cr-11Ni plate	A 266	7	TP406	150C361	-20	60	30	20.0	18.4	17.7	17.4	17.2	16.8	
32Cr-11Ni plate	A 266	7	TP407	150C361	-20	60	30	20.0	18.4	17.7	17.4	17.2	16.8	
18Cr-10Ni-3Mo pipe	A 312	8	TP317L	...	-325	75	30	23.0	20.0	20.0	18.9	17.7	16.8	
25Cr-20Ni pipe	A 312	8	TP310	150C361	-325	75	30	23.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.2	
Type 310S A 240	A 350	8	310S	150C361	-325									
25Cr-20Ni plate	A 409	8	TP310	150C361	-325									
18Cr-10Ni-Ti pipe wall $\leq \frac{1}{8}$ in. thick & weld	A 312	8	TP321	150C361	-425	75	38	10.0	20.0	20.0	20.0	19.3	18.3	
18Cr-10Ni-Ti plate wall $\leq \frac{1}{8}$ in. thick	A 358	8	321	150C361										
18Cr-10Ni-Ti plate wall $> \frac{1}{8}$ in. thick	A 378	8	TP321	150C361										
22Cr-12Ni pipe	A 312	8	TP209	150C361	-325	75	30	10.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.2	
Type 209S A 240	A 358	8	209S	150C361	-325									
22Cr-12Ni plate	A 409	8	TP209	150C361	-325									
18Cr-0Ni	A 453	8	CPH8	150C361	-425	70	30	10.0	20.0	19.8	17.5	16.4	15.7	

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)

TABLE A-1 (CONT'D) BASIC ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS ¹ Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated																			
Basic Allowable Stress S, ksi (1), at Metal Temperature, °F (1)																			
650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	Grade	Spec. No.
																			Stainless Steel (30) (40) Pipes and Tubes (2)
14.9	14.6	14.3	14.1	14.0	13.8	13.6	13.5	9.6	6.9	5.8	3.6	3.6	3.7	3.1	0.8	0.5	0.3	TP321	A 312
																			A 376
13.7	13.5	13.3	13.0	12.8	11.9	9.9	7.8	6.8	5.1	4.0	3.2	2.6	2.1	1.7	1.3	1.0	0.9	TP304L TP304L 304L	A 269 A 312 A 350
13.2	12.9	12.6	12.4	12.3	11.8	11.5	11.2	10.8	10.2	8.8	6.4	4.7	3.5	2.5	1.8	1.3	1.0	TP316L TP316L 316L	A 269 A 312 A 350
																		TP321	A 312
																		TP321	A 376
14.9	14.6	14.3	14.1	14.0	13.8	13.6	13.5	11.7	9.1	6.9	5.4	4.3	3.2	2.5	1.9	1.5	1.1	TP321H TP321H	A 312 A 376
17.4	17.1	16.8	16.3	15.8	15.4	15.0	14.4	8.4	6.4	5.0	3.7	2.9	2.3	1.7	1.3	0.9	0.8	CPH8	A 451
17.4	17.1	16.8	16.3	15.8	15.4	15.0	14.4	9.8	8.4	7.2	6.0	4.8	3.4	2.5	1.5	1.1	0.8	CPH20	A 451
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	TP409	A 268
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	TP409Ti	A 268
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	CPFI100G	A 451
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	36-B-2H	A 376
16.5	16.2	15.7	15.1	14.4	9.3	8.4	4.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	TP405	A 268
16.5	16.2	15.7	15.1	14.4	9.3	8.4	4.4	4.4	2.9	3.8	3.8	...	...	...	...	...	...	TP410	A 268
16.2	15.6	15.3	14.4	14.4	9.3	8.5	6.5	4.3	3.2	2.4	1.8	...	...	...	...	...	...	TP430	A 268
16.6	16.2	15.8	15.5	15.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	TP317L	A 312
10.8	10.3	10.0	10.5	14.6	13.8	12.5	11.0	7.1	5.0	3.4	2.5	1.5	1.0	0.5	0.4	0.3	0.2	TP317 TP317 TP317	A 312 A 358 A 459
																		TP321	A 312
17.9	17.5	17.2	16.9	16.7	16.6	16.4	16.2	9.8	6.9	5.3	3.6	2.6	1.7	1.1	0.8	0.5	0.3	321 TP321	A 268 A 376
																		TP321	A 409
18.8	18.3	18.0	17.5	17.6	13.9	12.5	10.5	8.5	6.5	5.0	3.8	2.9	2.3	1.8	1.3	0.9	0.7	TP304 304S TP304	A 312 A 358 A 409
15.3	15.1	14.9	14.8	14.9	12.7	12.3	10.8	9.5	7.4	5.8	4.4	3.3	2.4	1.8	1.3	1.0	0.8	CPH8	A 451

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías [ASME B31.1] (Continuación)

TABLE A-1 (CONT'D) BASIC ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS ¹ Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated													
Material	Spec. No.	P-No. or S-No. (3)	Grade	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi		Min. Temp. to 100	200	300	400	500	600
						Tensile	Yield						
Stainless Steel (31) (4) (Cont'd)													
Pipes and Tubes (2) (Cont'd)													
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	...	-425	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
Type 347 A 240	A 312	8	347	(201361)	-425								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-425								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-425								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	...	-325								
Type 348 A 240	A 312	8	348	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325	75	30	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.3
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 312	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca pipe	A 409	8	TP 304	(201361)	-325								
304-18M-Ca													

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías
[ASME B31.1] (Continuación)

650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	Grade	Spec. No.
Stainless Steel (3) (4) (Cont'd) Pipes and Tubes (2) (Cont'd)																			
19.0	18.5	18.5	18.4	18.2	18.2	18.2	18.0	17.7	9.1	6.1	4.8	3.3	2.2	1.6	1.2	0.9	0.8	TP347	A 312
																		347	A 358
																		TP347	A 376
																		TP347	A 409
																		TP348	A 312
18.0	18.3	18.0	17.4	17.5	17.3	17.4	17.5	17.6	8.4	6.4	3.8	2.9	2.3	1.7	1.3	0.9	0.8	TP348	A 358
																		348	A 376
																		TP348	A 409
																		TP348	A 376
																		TP348	A 409
18.0	18.3	18.0	17.5	17.6	17.5	17.5	17.6	17.6	9.8	7.8	3.3	6.0	4.8	3.5	2.3	1.6	1.3	CPH10 or CPH10	A 451
																		TP316	A 312
																		316	A 358
																		TP316	A 376
																		TP316	A 409
18.0	18.3	18.0	17.5	17.6	17.5	17.5	17.6	17.6	9.8	7.8	3.3	6.0	4.8	3.5	2.3	1.6	1.3	CPH10	A 451
																		TP316	A 312
																		316	A 358
																		TP316	A 376
																		TP316	A 409
17.9	17.5	17.2	16.9	16.7	16.6	16.6	16.7	16.7	11.7	9.3	6.9	5.4	4.3	3.2	2.5	1.9	1.5	TP321	A 312
																		321	A 358
																		TP321	A 376
																		TP321	A 409
																		TP321H	A 376
16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.5	15.4	15.3	14.5	12.6	9.8	7.4	5.5	4.3	3.3	2.3	1.7	1.3	TP316H	A 312
																		316H	A 358
																		TP316H	A 376
																		TP316H	A 409
																		TP316H	A 376
19.0	18.6	18.5	18.4	18.2	18.1	18.1	18.0	17.7	14.2	10.5	7.9	5.9	4.4	3.2	2.5	1.8	1.3	TP347H	A 312
																		347H	A 358
																		TP347H	A 376
																		TP347H	A 409
																		TP347H	A 376

(continued)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.1.-Máxima tensión permisible para aceros al carbono en tuberías
[ASME B31.1] (Continuación)

BASIC ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS ¹														
Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated														
Basic Allowable Stress S , ksi (1), at Metal Temperature, °F (2)														
400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	Grade	Spec. No.
Carbon Steel (Cont'd)														
Pipes and Tubes (2) (Cont'd)														
25.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X60	API 5L
25.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X65	API 5L
27.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X70	API 5L
30.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X80	API 5L
25.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X60	A 381
Pipes (Structural Grade) (2)														
11.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
15.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
15.9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
16.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
16.9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
16.6	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
18.4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
19.9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
Plates and Sheets														
13.7	13.0	11.6	11.1	11.5	10.2	9.0	7.7	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A	A 285
15.4	14.6	13.3	12.1	11.0	11.1	9.6	8.0	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	B	A 285
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	...	...	...	...	...	55	A 516
17.2	16.2	14.8	14.3	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	C	A 285
16.3	17.3	15.6	15.5	15.4	12.9	10.8	8.6	...	...	...	...	...	60	A 516
16.3	17.3	15.6	15.5	15.4	12.9	10.8	8.6	6.5	4.5	2.5	...	...	60	A 516
20.0	18.0	17.3	17.0	16.8	13.8	11.4	8.9	...	...	...	...	...	65	A 516
20.0	18.0	17.3	17.0	16.8	13.8	11.4	8.9	6.5	4.5	2.5	...	...	65	A 516
21.7	20.5	18.7	18.4	18.3	14.7	12.0	9.2	...	...	...	...	...	70	A 516
21.7	20.5	18.7	18.4	18.3	14.7	12.0	9.2	6.5	4.5	2.5	...	...	70	A 516
22.9	22.9	22.6	22.0	21.4	...	...	...	...	...	...	...	...	Cl. 1	A 537
22.9	21.6	19.7	19.4	19.2	15.6	12.6	9.3	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	...	A 299
24.0	22.7	20.7	20.4	20.2	15.6	12.6	9.3	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	...	A 299

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.2.-Tensiones máximas admisibles para metales (Código ASME, Sección II)

TABLE 1A (CONT'D)
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3,* AND SECTION VIII, DIVISION 1
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES *S* FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Design./UNS No.	Class/Heat/Temper.	Size/Thickness, in.	P.No.	Group No.
1	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316H	S31609	...	> 5	8	1
2	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316H	S31609	...	> 5	8	1
3	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-336	F316H	S31609	...	...	8	1
4	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-336	F316H	S31609	...	...	8	1
5	16Cr-12Ni-2Mo	Forged pipe	SA-430	FP316H	S31609	...	...	8	1
6	16Cr-12Ni-2Mo	Forged pipe	SA-430	FP316H	S31609	...	...	8	1
7	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316	S31600	...	≤ 5	8	1
8	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316	S31600	...	≤ 5	8	1
9	16Cr-12Ni-2Mo	Seam. tube	SA-213	TP316	S31600	...	...	8	1
10	16Cr-12Ni-2Mo	Seam. tube	SA-213	TP316	S31600	...	...	8	1
11	16Cr-12Ni-2Mo	Plate	SA-240	316	S31600	...	...	8	1

TABLE 1A (CONT'D)														
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3,* AND SECTION VIII, DIVISION 1														
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES <i>S</i> FOR FERROUS MATERIALS														
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)														
Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding														
Line No.	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	26.0	...	20.0	...	19.4	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6
2	26.0	...	17.5	...	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5
3	26.0	...	20.0	...	19.4	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6
4	26.0	...	17.5	...	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5
5	26.0	...	20.0	...	19.4	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6
6	26.0	...	17.5	...	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5
7	26.0	...	20.0	...	20.0	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6
8	26.0	...	17.5	...	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5
9	26.0	...	20.0	...	20.0	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6
10	26.0	...	17.5	...	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5
11	26.0	...	20.0	...	20.0	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.3.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte1

TABLE 1A (CONT'D) SECTION I: SECTION III, CLASS 2 AND 3;* AND SECTION VIII, DIVISION 1 MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS (*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)									
Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Group/UNS No.	Class/Cond./Temper.	Size/Thickness, in.	P.No.	Group No.
1	Carbon steel	Wld. pipe	SA-134	A283B	...	...	...	1	1
2	Carbon steel	Plate	SA-283	B	...	...	...	1	1
3	Carbon steel	Plate	SA-285	B	K02100	...	...	1	1
4	Carbon steel	Plate	SA-285	B	K02100	...	...	1	1
5	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	A50	K02100	...	...	1	1
6	Carbon steel	Sheet	SA-414	B	K02100	...	...	1	1
7	Carbon steel	Plate	SA1EN 10120-3	P215NH	...	...	2 < r ≤ 4	1	1
8	Carbon steel	Bar	SA-675	55	...	...	...	1	1
9	Carbon steel	Bar	SA-675	55	...	...	...	1	1
10	Carbon steel	Wld. pipe	SA-134	A283C	K02400	...	...	1	1
11	Carbon steel	Plate	SA-283	C	K02400	...	...	1	1
12	Carbon steel	Plate	SA-285	C	K02600	...	...	1	1
13	Carbon steel	Smts. & wld. pipe	SA-333	1	K03000	...	...	1	1
14	Carbon steel	Smts. & wld. tube	SA-334	1	K03000	...	...	1	1
15	Carbon steel	Wld. tube	SA-334	1	K03000	...	...	1	1
16	Carbon steel	Plate	SA-516	55	K01800	...	...	1	1
17	Carbon steel	Smts. pipe	SA-524	II	K02100	...	...	1	1
18	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CS55	K02600	...	...	1	1
19	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CS55	K02600	...	...	1	1
20	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	A55	K02600	...	...	1	1
21	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B55	K02600	...	...	1	1
22	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	CS5	K01800	...	...	1	1
23	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	E55	K02600	...	...	1	1
24	Carbon steel	Sheet	SA-414	C	K02500	...	...	1	1
25	Carbon steel	Plate	SA1EN 10120-3	P215NH	...	...	≤ 2	1	1
26	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27	Carbon steel	Bar	SA-36	...	K02400	...	...	1	1
28	Carbon steel	Plate, sheet	SA-36	...	K02400	...	...	1	1
29	Carbon steel	Plate, sheet	SA-662	A	K01100	...	...	1	1
30	Carbon steel	Forgings	SA-301	...	K03500	60	...	1	1
31	Carbon steel	Castings	SA-216	WCA	J02500	...	...	1	1
32	Carbon steel	Forgings	SA-206	1	K03500	...	...	1	1
33	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF1	K03000	1	...	1	1
34	Carbon steel	Castings	SA-302	LCA	J02500	...	...	1	1
35	Carbon steel	Cast pipe	SA-660	WCA	J02500	...	...	1	1
36	Carbon steel	Bar	SA-675	60	...	...	...	1	1
37	Carbon steel	Bar	SA-675	60	...	...	...	1	1
38	Carbon steel	Forgings	SA-705	1	K03040	...	...	1	1

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.3.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte2

TABLE 1A (CONT'D)
SECTION I: SECTION III, CLASS 2 AND 3;* AND SECTION VIII, DIVISION 1
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES *S* FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
	20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	14.3	...	14.3	...	14.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2	14.3	14.3	14.3	...	14.3	14.3	14.3	13.8	13.3	...	...	...	...	...
3	14.3	...	14.3	...	14.3	14.3	14.3	13.8	13.3	22.5	22.0	9.4	7.3	5.0
4	14.3	14.3	14.3	...	14.3	14.3	14.3	13.8	13.3	22.5	11.2	9.6	8.2	5.9
5	14.3	...	14.3	...	14.3	14.3	14.3	13.8	13.3	22.5	...	...	...	...
6	14.3	14.3	14.3	...	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	12.5	11.2	9.6	8.2	5.9
7	15.3	15.3	15.3	...	15.3	15.3	...	...	...	...	...	...	...	...
8	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	14.9	14.1	13.6	13.1	12.7	10.8	8.7	5.9
9	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	14.9	14.1	13.6	...	...	...	...	...
10	15.7	...	15.7	...	15.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...
11	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	...	...	...	...	...
12	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
13	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
14	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
15	13.4	13.4	13.4	...	13.4	13.4	13.4	13.0	12.6	...	...	...	...	...
16	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
17	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
18	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
19	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
20	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
21	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
22	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
23	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
24	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	25.6	13.0	10.8	8.7	5.9
25	15.1	15.1	15.1	...	15.1	15.1	...	...	...	...	...	...	...	...
26	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27	15.6	15.6	15.6	...	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	25.6	13.0	10.8	8.7	5.9
28	15.6	...	15.6	...	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	25.6	...	...	...	...
29	15.6	15.6	15.6	...	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	25.6	...	...	...	...
30	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
31	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
32	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
33	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
34	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...
35	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
36	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	...
37	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9
38	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	...	...	...	...	...

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.4.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte 1

TABLE 1A (CONT'D) SECTION III, CLASS 2 AND 3; AND SECTION VIII, DIVISION 1 MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS (*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)									
Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Design./UNS No.	Class/Cond./Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
1	Carbon steel	Stm's. pipe	SA-106	C	K01501	...	...	1	2
2	Carbon steel	Wld. tube	SA-178	D	...	...	...	1	2
3	Carbon steel	Wld. tube	SA-178	D	...	...	...	1	2
4	Carbon steel	Wld. tube	SA-178	D	...	...	...	1	2
5	Carbon steel	Stm's. tube	SA-210	C	K01501	...	...	1	2
6	Carbon steel	Casings	SA-216	WCC	J02600	...	...	1	2
7	Carbon steel	Stm's. & wld. flanges	SA-234	WPC	K01501	...	...	1	2
8	Carbon steel	Casings	SA-262	LCC	J02600	...	...	1	2
9	Carbon steel	Casings	SA-487	16	...	A	...	1	2
10	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	3	4 < t ≤ 6	1	3
11	Carbon steel	Stm's. tube	SA-556	G2	K01506	...	...	1	2
12	Carbon steel	Wld. tube	SA-557	G2	K01506	...	...	1	2
13	Carbon steel	Cast pipe	SA-460	WCC	J02505	...	...	1	2
14	Carbon steel	Bar	SA-492	Q/A	K01504	...	...	1	2
15	Carbon steel	Bar	SA-496	G	K01200	...	...	1	2
16	Carbon steel	Sheet	SA-414	F	K01102	...	...	1	2
17	Carbon steel	Plate	SA-462	G	K02007	...	...	1	2
18	Carbon steel	Plate	SA-437	...	K12437	2	4 < t ≤ 6	1	3
19	Carbon steel	Plate	SA-738	G	...	...	4 < t ≤ 6	1	3
20	Carbon steel	Plate	SA-437	...	K12437	1	≤ 2 1/2	1	2
21	Carbon steel	Wld. pipe	SA-471	CR75	K12437	...	≤ 2 1/2	1	2
22	Carbon steel	Wld. pipe	SA-472	D70	K12437	...	≤ 2 1/2	1	2
23	Carbon steel	Wld. pipe	SA-491	CM 5-75	K12437	...	≤ 2 1/2	1	2
24	Carbon steel	Plate	SA-414	T-100	...	...	≤ 4	1	2
25	Carbon steel	Plate	SA-455	...	K01200	...	3/4 < t ≤ 0.50	1	2
26	Carbon steel	Forgings	SA-266	3	K01501	...	...	1	2
27	Carbon steel	Plate	SA-455	...	K01200	...	≤ 3/4	1	2
28	Carbon steel	Plate	SA-299	...	K01800	...	> 1	1	2
29	Carbon steel	Wld. pipe	SA-471	CR75	K01800	...	> 1	1	2
30	Carbon steel	Wld. pipe	SA-472	N75	K01800	...	> 1	1	2
31	Carbon steel	Wld. pipe	SA-491	CM 5-75	K01800	...	> 1	1	2
32	Carbon steel	Plate	SA-299	...	K01800	...	≤ 1	1	2
33	Carbon steel	Wld. pipe	SA-491	CM 5-75	K01800	...	≤ 1	1	2
34	Carbon steel	Forgings	SA-372	B	K04001	...	...	1	2
35	Carbon steel	Sheet	SA-414	G	K01103	...	...	1	2
36	Carbon steel	Plate	SA-738	A	K12447	...	...	1	2
37	Carbon steel	Plate	SA-437	...	K12437	3	2 1/2 < t ≤ 4	1	3
38	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	2	2 1/2 < t ≤ 4	1	3
39	Carbon steel	Wld. pipe	SA-491	CM 5H-80	K12437	...	2 1/2 < t ≤ 4	1	3
40	Carbon steel	Plate	SA-738	G	...	...	2 1/2 < t ≤ 4	1	3

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.4.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte 2

TABLE 1A (CONT'D)
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3;* AND SECTION VIII, DIVISION 1
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
2	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
3	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
4	17.0	...	17.0	...	17.0	17.0	17.0	17.0	16.0	15.5	12.6	10.2	7.9	5.7
5	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
6	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
7	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	...	...
8	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	...	...	...	...
9	20.0	...	19.9	...	18.8	18.1	17.9	17.9	17.9	17.9	...	...	...	...
10	20.0	20.0	20.0	...	19.7	19.5	19.9	19.0	17.6	17.2	...	...	...	...
11	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	...	...
12	17.0	17.0	17.0	...	17.0	17.0	17.0	17.0	16.0	15.5	12.6	10.2	7.9	5.7
13	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
14	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	14.8	12.0	...	...
15	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	19.8	18.3	...	...	...	...
16	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	20.0	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
17	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	21.0	20.0	18.3	...	...	...	...
18	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...	...
19	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	...	...	...	...	...
20	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...	...
21	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...	...
22	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...	...
23	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...	...
24	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	21.3	20.3	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
25	20.9	20.9	20.9	...	20.9	20.9	20.1	19.9	18.3	...	...	...	...	...
26	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	20.4	19.7	18.6	17.0	14.7	12.6	9.3	6.7
27	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	20.6	19.4	18.8	...	...	...	...	...
28	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	19.8	19.1	16.7	12.6	9.3	6.7
29	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	19.8	19.1	...	...	...	...
30	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	19.8	19.1	...	...	...	...
31	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	19.8	19.1	...	...	...	...
32	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	20.8	19.6	15.7	12.6	9.3	6.7
33	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	20.0	19.6	...	...	...	...
34	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	...	...	...	...	...
35	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	19.6	15.7	12.6	9.3	6.7
36	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	19.6	...	...	...	...
37	21.4	...	21.4	...	21.3	20.9	20.9	21.9	20.0	18.3	...	...	...	...
38	21.4	...	21.4	...	21.3	20.9	20.9	21.9	20.0	19.6	...	...	...	...
39	21.4	...	21.4	...	21.3	20.9	20.9	21.9	20.0	19.6	...	...	...	...
40	21.4	...	21.4	...	21.3	20.9	20.9	21.9	20.0	...	...	...	...	...

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.5.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte1

TABLE A-1 (CONT'D)
SECTION I, SECTION III, CLASS 2 AND 3,* AND SECTION VIII, DIVISION 1
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Design./UNS No.	Class/Cond./Temper.	Stress/Thickness, in.	P-No.	Group No.
1	Carbon steel	Sml. pipe	SA-106	C	K03501	...	...	1	2
2	Carbon steel	Wk. tube	SA-178	D	...	...	...	1	2
3	Carbon steel	Wk. tube	SA-178	D	...	...	...	1	2
4	Carbon steel	Wk. tube	SA-178	D	...	...	...	1	2
5	Carbon steel	Sml. tube	SA-210	C	K03501	...	...	1	2
6	Carbon steel	Castings	SA-216	WCC	J02500	...	...	1	2
7	Carbon steel	Sml. & wld. fittings	SA-234	WPC	K03501	...	...	1	2
8	Carbon steel	Castings	SA-257	LCD	J02500	...	...	1	2
9	Carbon steel	Castings	SA-407	30	...	A	...	1	2
10	Carbon steel	Plate	SA-407	...	K12407	1	4 < t ≤ 6	1	3
11	Carbon steel	Sml. tube	SA-408	C2	K03500	...	...	1	2
12	Carbon steel	Wk. tube	SA-408	C2	K03500	...	...	1	2
13	Carbon steel	Cast pipe	SA-408	WCC	J02500	...	...	1	2
14	Carbon steel	Bar	SA-408	B700	K03501	...	...	1	2
15	Carbon steel	Bar	SA-408	C	K03500	...	...	1	2
16	Carbon steel	Sheet	SA-414	F	K03502	...	...	1	2
17	Carbon steel	Plate	SA-462	C	K07007	...	...	1	2
18	Carbon steel	Plate	SA-462	...	K12407	2	4 < t ≤ 6	1	3
19	Carbon steel	Plate	SA-738	C	...	...	4 < t ≤ 6	1	3
20	Carbon steel	Plate	SA-738	...	K12407	1	4 < t ≤ 6	1	3
21	Carbon steel	Wk. pipe	SA-472	CD70	K12407	...	5 < t ≤ 6	1	2
22	Carbon steel	Wk. pipe	SA-472	170	K12407	...	5 < t ≤ 6	1	2
23	Carbon steel	Wk. pipe	SA-472	CMSH-70	K12407	...	5 < t ≤ 6	1	2
24	Carbon steel	Plate	SA-738	7-490	...	...	5 < t ≤ 6	1	2
25	Carbon steel	Plate	SA-738	...	K03500	...	5 < t ≤ 6	1	2
26	Carbon steel	Forgings	SA-738	3	K03501	...	...	1	2
27	Carbon steel	Plate	SA-738	...	K03500	...	6 < t ≤ 9	1	2
28	Carbon steel	Plate	SA-738	...	K03500	...	5 < t ≤ 6	1	2
29	Carbon steel	Wk. pipe	SA-472	CK70	K03500	...	5 < t ≤ 6	1	2
30	Carbon steel	Wk. pipe	SA-472	N70	K03500	...	5 < t ≤ 6	1	2
31	Carbon steel	Wk. pipe	SA-472	CMS-70	K03500	...	5 < t ≤ 6	1	2
32	Carbon steel	Plate	SA-738	...	K03500	...	6 < t ≤ 9	1	2
33	Carbon steel	Wk. pipe	SA-472	CMS-70	K03500	...	5 < t ≤ 6	1	2
34	Carbon steel	Forgings	SA-738	B	K03501	...	...	1	2
35	Carbon steel	Sheet	SA-414	G	K03503	...	...	1	2
36	Carbon steel	Plate	SA-738	A	K12407	...	...	1	2
37	Carbon steel	Plate	SA-407	...	K12407	3	2 1/2 < t ≤ 4	1	3
38	Carbon steel	Plate	SA-407	...	K12407	2	2 1/2 < t ≤ 4	1	3
39	Carbon steel	Wk. pipe	SA-408	CMSH-70	K12407	...	2 1/2 < t ≤ 4	1	3
40	Carbon steel	Plate	SA-738	C	...	...	2 1/2 < t ≤ 4	1	3

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.5.-Tensiones máximas admisibles para metales (ASME)-Parte2

TABLE 1A (CONT'D) SECTION I, SECTION III, CLASS 2 AND 3, AND SECTION VIII, DIVISION 1 MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES FOR FERROUS MATERIALS (*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)													
Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi, for Metal Temperatures, °F, Not Exceeding)												
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	900
1	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	9.1
2	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	9.1
3	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	9.1
4	17.0	...	17.0	...	17.0	17.0	17.0	17.1	16.8	15.3	12.0	10.0	7.9
5	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	9.1
6	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	9.1
7	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	...
8	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	...	...	...
9	20.0	...	19.9	...	18.8	18.1	17.9	17.9	17.9	17.9	...	...	...
10	20.0	20.0	20.0	...	19.7	19.5	19.9	18.8	17.0	17.7	...	...	...
11	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	...
12	17.0	17.0	17.0	...	17.0	17.0	17.0	17.1	16.8	15.3	12.0	10.0	7.9
13	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	9.1
14	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	14.0	12.0	...
15	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	19.8	18.3	...	...	...
16	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	20.0	18.3	14.0	12.0	9.1
17	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	20.1	20.0	18.3	...	...	...
18	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...
19	20.0	...	20.0	...	19.7	19.6	19.8	19.8	19.8	...	...	...	...
20	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...
21	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...
22	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...
23	20.0	...	20.0	...	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	...	...	...
24	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	18.3	14.0	12.0	9.1
25	20.9	20.9	20.9	...	20.9	20.9	20.1	18.1	18.3	...	...	...	...
26	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	20.1	18.2	18.3	17.9	14.0	12.0	9.1
27	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	20.9	19.4	18.0	...	...	...	...
28	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	21.4	20.4	19.8	19.1	14.0	12.0	9.1
29	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	20.4	19.8	19.1	...	...	...
30	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	20.4	19.8	19.1	...	...	...
31	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	20.4	19.8	19.1	...	...	...
32	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	20.6	19.9	18.7	12.0	9.1
33	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	20.6	19.9	...	...	...
34	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	...	...	...	...
35	21.4	21.4	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	19.9	18.7	12.0	9.1
36	21.4	...	21.4	...	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	19.9	...	...	...
37	21.4	...	21.4	...	21.1	20.9	20.9	20.1	20.9	18.3	...	...	...
38	21.4	...	21.4	...	21.1	20.9	20.9	20.1	20.9	18.3	...	...	...
39	21.4	...	21.4	...	21.1	20.9	20.9	20.1	20.9	18.3	...	...	...
40	21.4	...	21.4	...	21.1	20.9	20.9	20.1	20.9	...	...	...	...

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam.	(3) Designa- tion	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) Int. of Flange per ft of Pipe	(8) Sq ft Outside Surface per ft	(9) Sq ft Inside Surface per ft	(10) Flow Area in. ²	(11) Area of Metal in. ²	(12) Moment of Inertia in. ⁴	(13) Section Modulus in. ³	(14) Radius of Gyration in.
	D		t	d					A		I	Z	R
1/8 6	.405 10.3	105 304 X-50g	.045 .058 .055	.360 .288 .315	.195 .224 .214	.0320 .0248 .0157	.105 .076 .056	.0504 .0368 .0253	.0743 .0548 .0384	.0548 .0375 .0258	.00590 .00430 .00300	.00443 .00330 .00200	.1270 .1215 .1145
1/4 2	.540 13.7	125 304 X-80g	.065 .068 .116	.475 .464 .352	.330 .424 .435	.0572 .0451 .0312	.141 .141 .121	.0772 .0655 .0384	.1202 .1041 .0716	.0912 .1125 .0378	.00780 .00331 .00378	.01032 .01230 .01095	.1685 .1628 .1647
3/8 10	.675 17.1	150 304 X-50g	.085 .091 .125	.590 .583 .553	.425 .507 .528	.1013 .0827 .0529	.177 .177 .157	.1427 .1295 .1195	.2353 .1912 .1426	.1542 .1072 .0772	.00590 .00733 .00602	.01743 .02160 .02054	.2180 .2090 .1991
1/2 15	.840 21.3	150 304 X-80g	.085 .129 .162	.755 .648 .667	.570 .648 .668	.1315 .1310 .1316	.220 .220 .220	.1784 .1708 .0660	.2955 .1908 .0669	.1974 .1818 .0643	.01430 .00710 .00426	.02410 .04070 .00772	.2692 .2613 .2182
3/4 20	1.050 26.7	150 304 X-50g	.085 .115 .154	.965 .954 .814	.685 .824 .843	.1653 .1320 .1075	.275 .275 .275	.2314 .2165 .1048	.4322 .3326 .4322	.3026 .3026 .4322	.00570 .00754 .00479	.06663 .07059 .00759	.3430 .3337 .3251
1 25	1.315 33.4	150 304 X-80g	.125 .154 .154	1.190 1.184 1.049	1.015 1.040 1.040	.1653 .1320 .1075	.324 .324 .324	.2672 .2672 .2672	.6248 .5479 .5479	.4128 .3165 .3165	.01680 .01030 .01030	.02760 .01030 .01030	.4092 .3940 .3940

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

**Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-
continuación-**

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
Nominal Pipe Size	Nominal Outside Diam.	Designa- tion	Wall Thick- ness	Inside Diam.	Weight per Foot	Wt of Water per ft of Pipe	Sq ft Outside Surface per ft	Sq ft Inside Surface per ft	Flow Area in. ²	Area of Metal in. ²	Moment of Inertia in. ⁴	Section Modulus in. ³	Radius of Gyration in.
	D		t						A	A	I	Z	R
1 1/4 32	1.660 42.2	10S	.109	1.442	1.608	.7062	.434	.2775	1.633	.5314	.1608	.1834	.5469
		S&S	.140	1.360	2.273	.8471	.434	.2620	1.465	.6625	.1947	.2346	.5397
		10S	.161	1.278	2.968	.9883	.434	.2466	1.283	.8818	.2418	.2913	.5237
		S&S	.250	1.100	5.764	.4575	.434	.2029	1.027	1.1870	.2033	.3421	.5093
1 1/2 40	1.900 48.3	10S	.106	1.682	2.088	.9910	.497	.4435	2.221	.913	.2469	.2590	.6348
		S&S	.145	1.610	2.717	.8333	.497	.4215	2.036	.930	.2669	.3202	.6226
		10S	.200	1.500	3.651	.7048	.497	.3627	1.787	1.398	.3912	.4118	.6052
		S&S	.281	1.387	4.852	.5082	.497	.3218	1.453	.4822	.5580	.5838	.5838
2 50	2.375 60.3	10S	.109	2.157	2.638	1.583	.622	.5647	2.654	.775	.5003	.4213	.8334
		S&S	.154	2.087	3.653	1.462	.622	.5481	2.355	1.175	.6657	.6866	.7871
		10S	.216	1.936	5.022	1.279	.622	.5074	2.563	1.477	.8679	.7306	.7855
		S&S	.250	1.875	5.673	1.198	.622	.4900	2.261	1.656	.9555	.8046	.7585
2 1/2 60	2.875 73.0	10S	.125	2.635	3.53	2.363	.753	.6600	3.453	1.836	.8679	.6872	.9372
		S&S	.203	2.465	8.79	2.072	.753	.6482	4.188	1.704	1.533	1.054	.8474
		10S	.276	2.325	7.86	1.834	.753	.6095	4.238	2.254	1.624	1.350	.8241
		S&S	.375	2.128	12.51	1.333	.753	.5644	3.947	2.948	2.333	1.838	.8838
3 80	3.500 88.9	10S	.125	3.250	4.33	3.22	.810	.833	5.340	1.372	1.621	1.541	1.190
		S&S	.156	3.196	5.59	3.45	.810	.825	5.062	1.629	2.299	1.313	1.194
		10S	.261	3.128	6.88	3.34	.810	.818	7.100	1.888	2.700	1.849	1.179
		S&S	.343	3.058	7.57	3.33	.810	.802	7.393	2.328	2.017	1.724	1.184
3 1/2 90	4.000 101.6	10S	.125	3.900	5.68	3.55	.810	.833	7.194	2.353	2.358	1.836	1.132
		S&S	.156	3.846	6.95	3.54	.810	.825	6.780	2.642	2.619	2.122	1.142
		10S	.261	3.826	10.33	3.80	.810	.801	9.000	3.016	3.882	2.220	1.180
		S&S	.343	3.754	14.32	3.34	.810	.807	9.407	4.214	5.044	2.852	1.094
4 100	4.500 114.3	10S	.125	4.625	6.97	3.81	.810	.833	11.15	1.85	2.764	1.377	1.172
		S&S	.156	4.571	8.24	4.04	.810	.825	11.54	2.152	2.659	1.460	1.171
		10S	.261	4.551	12.51	4.28	.810	.802	12.89	2.58	4.788	2.394	1.237
		S&S	.343	4.478	16.50	4.47	.810	.807	13.28	3.94	5.201	3.831	1.239
4 1/2 110	5.000 127.0	10S	.125	5.375	8.31	4.22	.810	.833	13.29	2.39	3.39	2.715	1.319
		S&S	.156	5.321	9.58	4.45	.810	.825	13.68	2.69	3.69	3.010	1.307
		10S	.261	5.301	13.85	4.69	.810	.802	15.00	3.016	4.782	3.220	1.360
		S&S	.343	5.228	17.84	4.69	.810	.807	15.39	4.411	5.600	4.020	1.402
5 125	5.563 141.3	10S	.125	6.125	9.66	4.63	.810	.833	15.39	2.83	3.88	3.800	1.428
		S&S	.156	6.071	10.93	4.86	.810	.825	15.78	3.127	4.177	4.091	1.416
		10S	.261	6.051	15.20	4.86	.810	.802	17.10	3.441	5.260	4.271	1.477
		S&S	.343	5.978	19.19	4.86	.810	.807	17.49	4.835	6.165	5.177	1.444
6 150	6.625 167.6	10S	.125	6.875	11.01	5.07	.810	.833	17.49	3.441	4.177	4.091	1.416
		S&S	.156	6.821	12.28	5.30	.810	.825	17.88	3.735	4.471	4.386	1.404
		10S	.261	6.801	16.56	5.07	.810	.802	19.80	3.735	5.600	4.671	1.477
		S&S	.343	6.728	20.55	5.07	.810	.807	20.19	5.129	6.500	5.577	1.444

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

**Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-
continuación-**

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diams.	(3) Design- ation	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) Wt. of Water per ft of Pipe	(8) Sq ft Outside Surface per ft	(9) Sq ft Inside Surface per ft	(10) Flow Area in ²	(11) Area of Metal in ²	(12) Moment of Inertia in ⁴	(13) Section Modulus in ³	(14) Radius of Gyration in.
	D			S					A	A	I	Z	R
5 125	5.563 141.3	10S	.134	5.295	7.77	9.54	1.496	1.388	22.02	2.29	8.42	3.028	1.603
		API	.150	5.261	9.02	9.36	1.496	1.378	21.66	2.88	9.18	3.087	1.613
		API	.160	5.167	10.60	9.16	1.456	1.359	21.13	3.17	11.49	4.126	1.603
		API	.319	5.125	13.21	9.04	1.456	1.342	20.63	3.89	13.14	4.728	1.601
		Std	.350	5.047	14.83	8.66	1.456	1.321	20.01	4.30	15.16	5.451	1.678
		API	.381	4.901	16.88	8.62	1.388	1.300	19.64	4.88	16.31	6.862	1.872
		API	.312	4.926	17.51	8.31	1.456	1.289	19.16	5.15	17.91	6.402	1.660
		API	.344	4.875	18.19	8.09	1.456	1.276	18.67	5.84	19.26	6.922	1.644
		X-Std	.375	4.813	20.78	7.87	1.496	1.280	18.16	6.11	22.07	7.451	1.839
		12S	.400	4.963	27.12	7.08	1.496	1.198	16.35	7.95	28.74	9.253	1.768
		16S	.435	4.919	32.98	6.32	1.456	1.139	14.61	9.70	33.23	10.303	1.763
		XK-Std	.750	4.959	38.25	5.62	1.456	1.094	12.87	11.34	33.52	12.590	1.723
6 150	6.625 168.3	12 Ga	.104	6.417	7.29	14.22	1.734	1.680	32.34	2.13	11.33	3.42	2.31
		10S	.124	6.357	9.29	13.70	1.734	1.680	31.75	2.73	14.36	4.34	2.39
		8 Ga	.164	6.297	11.33	13.50	1.734	1.649	31.14	3.33	17.38	5.28	2.28
		API	.188	6.240	12.60	13.31	1.734	1.639	30.70	3.80	19.71	6.38	2.28
		8 Ga	.194	6.237	13.34	13.25	1.734	1.633	30.55	3.92	20.29	6.12	2.27
		API	.319	6.167	15.03	13.25	1.734	1.620	30.10	4.41	22.66	6.84	2.27
		API	.350	6.125	17.03	12.80	1.734	1.606	29.60	5.01	25.55	7.71	2.26
		API	.377	6.071	18.68	12.55	1.734	1.581	29.06	5.54	28.00	8.48	2.25
		Std	.390	6.065	18.87	12.51	1.734	1.587	28.90	5.59	28.14	8.50	2.24
		API	.312	6.001	21.65	12.28	1.734	1.571	28.28	6.19	30.91	9.33	2.23
		API	.344	5.937	23.09	12.00	1.734	1.554	27.68	6.79	33.51	10.14	2.22
		API	.375	5.875	25.13	11.75	1.734	1.540	27.10	7.37	36.20	10.66	2.21
8 200	8.625 219.1	X-Std	.432	5.761	28.57	11.29	1.734	1.510	26.07	8.40	43.46	12.23	2.19
		16S	.400	6.028	32.72	10.88	1.734	1.478	24.88	9.83	48.60	13.78	2.16
		12S	.562	5.501	36.43	10.33	1.734	1.470	23.77	12.74	49.91	15.07	2.15
		16S	.718	5.189	45.33	9.16	1.734	1.389	21.15	13.38	58.99	17.81	2.10
		XK-Std	.864	4.907	53.19	8.14	1.734	1.280	18.63	15.64	68.35	20.02	2.09
		12 Ga	.104	8.417	9.47	24.1	3.38	2.524	55.8	3.75	35.3	5.85	3.61
		10 Ga	.124	8.357	12.15	23.8	3.38	2.188	54.8	3.57	32.3	7.48	3.60
		10S	.149	8.329	13.43	23.6	3.38	2.180	54.5	3.94	35.4	8.22	3.59
		8 Ga	.194	8.267	14.83	23.4	3.38	2.172	54.1	4.39	38.1	9.38	2.99
		API	.198	8.246	15.60	23.2	3.38	2.161	53.5	5.00	44.5	10.35	2.99
		8 Ga	.194	8.237	17.48	23.1	3.38	2.158	53.3	5.14	45.7	10.65	2.98
		API	.203	8.216	18.33	23.1	3.38	2.152	53.1	5.38	47.7	11.08	2.98
8 200	8.625 219.1	API	.319	8.167	18.64	22.9	3.38	2.149	52.7	5.80	51.3	11.66	2.97
		3 Ga	.339	8.147	21.42	22.6	3.38	2.133	52.1	6.30	55.4	12.64	2.96
		12S	.240	8.126	22.43	22.5	3.38	2.127	51.8	6.58	57.7	13.38	2.96
		12S	.277	8.071	24.73	22.2	3.38	2.115	51.3	7.39	63.3	14.69	2.95
		API	.312	8.001	27.72	21.8	3.38	2.098	50.3	8.19	70.8	16.37	2.94
		Std	.322	7.991	28.55	21.6	3.38	2.090	50.3	8.40	72.5	16.61	2.94
		API	.344	7.937	30.43	21.4	3.38	2.078	49.5	9.84	76.8	17.81	2.93
		API	.375	7.875	33.12	21.1	3.38	2.062	48.7	9.74	83.1	18.27	2.92
		6S	.400	7.813	35.73	20.6	3.38	2.045	47.9	10.48	86.8	20.58	2.91
		API	.400	7.740	36.33	20.4	3.38	2.029	47.2	11.27	94.7	21.67	2.90
		X-Std	.500	7.625	43.39	19.8	3.38	2.008	45.9	12.78	105.7	24.51	2.89
		12S	.593	7.436	50.60	18.6	3.38	1.947	43.5	14.66	121.4	28.14	2.85
		16S	.828	7.978	63.43	18.5	3.38	1.931	42.7	18.71	136.6	35.33	2.84
8 200	8.625 219.1	16S	.718	7.190	65.73	17.6	3.38	1.882	40.8	17.64	140.6	32.61	2.81
		14S	.812	7.501	67.60	16.7	3.38	1.823	38.5	19.63	151.8	35.65	2.78
		XK-Std	.879	6.978	72.42	16.1	3.38	1.800	37.1	21.50	162.0	37.58	2.76
		16S	.900	6.913	74.73	15.8	3.38	1.784	36.4	21.67	165.9	38.48	2.76

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

**Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-
continuación-**

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diams.	(3) Design- ation	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) Wt. of Water per ft. of Pipe	(8) Sq. ft. Outside Surface per ft.	(9) Sq. ft. Inside Surface per ft.	(10) Flow Area in. ²	(11) Area of Metal in. ²	(12) Moment of Inertia in. ⁴	(13) Section Modulus in. ³	(14) Radius of Gyration in.
	D		t	d					A	A	I	Z	R
10 250	10.750 273.3	12 Ga.	.104	10.542	11.83	37.8	2.61	2.76	87.3	3.48	49.3	9.18	3.76
		10 Ga.	.134	10.482	15.31	37.4	2.61	2.74	88.3	4.47	62.0	11.71	3.75
		8 Ga.	.164	10.422	18.58	37.0	2.61	2.73	89.3	5.45	75.4	14.22	3.74
		100	.185	10.420	18.85	36.9	2.61	2.73	89.3	5.53	75.9	14.29	3.74
		API	.189	10.374	21.13	36.7	2.61	2.73	84.5	8.32	68.5	16.10	3.74
		6 Ga.	.194	10.382	21.89	36.6	2.61	2.71	84.3	8.43	69.7	16.66	3.73
		API	.202	10.344	23.85	36.5	2.61	2.71	84.5	8.71	69.9	17.35	3.73
		API	.219	10.310	24.80	36.2	2.61	2.70	83.4	7.24	100.5	18.70	3.72
		3 Ga.	.239	10.272	28.09	35.9	2.61	2.68	82.6	7.89	109.2	20.32	3.72
		20	.250	10.250	28.03	35.9	2.61	2.68	82.8	8.28	113.8	21.12	3.71
		API	.279	10.182	31.20	35.3	2.61	2.66	81.8	9.18	128.9	23.42	3.70
		30	.307	10.138	34.34	35.0	2.61	2.65	80.7	10.07	137.4	25.57	3.69
		API	.344	10.082	38.28	34.5	2.61	2.63	79.5	11.26	152.3	28.35	3.68
		Std.	.365	10.030	42.48	34.1	2.61	2.63	78.9	11.91	163.7	29.60	3.67
		API	.439	9.974	48.29	33.2	2.61	2.58	78.6	14.10	199.8	35.13	3.65
		X-2g	.500	9.750	54.74	32.3	2.61	2.56	74.7	16.10	212.0	39.43	3.63
		60	.592	9.584	64.40	31.1	2.61	2.50	71.8	19.91	244.6	45.56	3.60
		100	.719	9.314	77.90	29.3	2.61	2.44	66.1	22.62	285.2	53.20	3.56
		—	.750	9.250	82.10	29.1	2.61	2.43	67.2	23.56	298.2	55.10	3.54
		120	.840	9.064	89.30	27.9	2.61	2.37	64.5	26.23	324.3	60.94	3.51
		140	1.000	8.750	104.26	26.1	2.61	2.29	62.1	30.69	367.8	68.43	3.46
		180	1.125	8.500	116.06	24.6	2.61	2.23	58.7	34.01	399.4	74.91	3.43
12 300	12.750 323.8	12 Ga.	.104	12.542	14.1	53.8	3.34	3.28	123.9	4.13	82.6	12.9	4.47
		10 Ga.	.134	12.482	16.1	53.0	3.34	3.27	122.4	5.31	105.7	16.8	4.46
		8 Ga.	.164	12.422	22.1	52.5	3.34	3.25	121.2	6.48	128.4	20.1	4.45
		100	.180	12.580	24.2	52.2	3.34	3.24	120.6	7.11	142.4	22.9	4.44
		6 Ga.	.194	12.582	26.0	52.0	3.34	3.23	120.0	7.88	152.9	23.7	4.44
		API	.203	12.544	27.2	52.0	3.34	3.23	119.9	7.89	157.2	24.7	4.43
		API	.219	12.512	28.3	51.7	3.34	3.22	119.1	8.82	167.8	26.9	4.43
		3 Ga.	.239	12.472	32.0	51.3	3.34	3.21	118.3	9.39	183.8	28.8	4.42
		20	.250	12.450	33.4	51.3	3.34	3.21	118.0	9.84	182.3	30.2	4.42
		API	.261	12.489	37.4	50.9	3.34	3.19	116.7	11.01	214.1	33.8	4.41
		API	.312	12.429	41.5	50.1	3.34	3.17	115.9	12.19	238.5	37.0	4.40
		30	.350	12.390	45.9	49.7	3.34	3.15	114.9	12.99	248.5	39.3	4.39
		API	.344	12.482	46.5	49.7	3.34	3.16	114.5	13.46	259.5	40.7	4.38
		Std.	.375	12.000	49.6	48.9	3.34	3.14	112.1	14.58	279.3	43.8	4.37
		40	.406	11.838	53.6	48.5	3.34	3.13	111.9	15.74	300.3	47.1	4.37
		API	.438	11.874	57.5	48.2	3.34	3.11	111.0	16.95	321.5	50.4	4.36
		60	.592	11.636	72.2	46.0	3.34	3.04	106.2	21.52	402.5	62.8	4.31
		—	.825	11.500	80.9	44.9	3.34	3.01	103.8	23.81	438.7	68.8	4.29
		80	.887	11.376	86.6	44.0	3.34	2.98	101.6	26.03	475.2	74.8	4.27
		—	.750	11.250	96.2	43.1	3.34	3.04	99.4	29.27	512.7	82.1	4.26
		100	.840	11.064	100.0	41.8	3.34	2.96	98.1	31.53	551.8	88.1	4.22
		120	.875	11.000	110.9	41.1	3.34	2.98	95.5	32.64	578.5	93.7	4.21
		—	1.000	10.750	126.6	38.3	3.34	2.91	90.8	36.91	641.7	100.7	4.17
		140	1.125	10.500	140.0	37.5	3.34	2.75	88.8	41.09	702.7	106.9	4.13
		—	1.250	10.250	153.8	36.8	3.34	2.68	82.5	45.16	758.5	118.5	4.09
		180	1.312	10.126	181.0	34.9	3.34	2.66	82.8	67.14	781.3	122.8	4.07
		—	1.250	10.000	187.2	34.0	3.34	2.62	78.5	49.14	907.3	126.6	4.05
		—	1.500	9.750	190.4	32.4	3.34	2.55	74.7	53.01	953.8	133.9	4.01

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

**Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-
continuación-**

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	
Nominal Pipe Size	Nominal Outside Diam.	Design- ation	Wall Thick- ness	Inside Diam.	Weight per Foot	Wt. of Hose per ft of Pipe	Sq ft Outside Surface per ft	Sq ft Inside Surface per ft	Flow Area, in. ²	Area of Metal in. ²	Moment of Inertia, in. ⁴	Section Modulus, in. ³	Radius of Gyration, in.
14 350	14.000 355.6	10 Ga.	.134	13.732	20	64.2	3.67	3.56	146.1	9.94	142.4	20.1	4.90
		5 Ga.	.164	13.672	24	83.8	3.67	3.56	146.8	11.15	172.7	24.4	4.90
		3 Ga.	.164	13.672	20	63.1	3.67	3.56	146.8	9.94	200.8	28.7	4.90
		API	.212	13.580	31	122.8	3.67	3.56	144.8	9.10	218.2	30.9	4.87
		API	.219	13.562	32	123.0	3.67	3.56	144.8	9.40	225.1	32.2	4.87
		3 Ga.	.239	13.522	38	122.3	3.67	3.54	143.8	10.33	244.8	38.0	4.87
		10	.280	13.480	37	121.1	3.67	3.64	143.8	10.83	268.0	38.8	4.86
		API	.281	13.438	41	121.5	3.67	3.62	141.8	12.11	285.2	42.7	4.86
		20	.312	13.378	46	120.8	3.67	3.50	140.8	13.44	314.8	48.0	4.84
		API	.344	13.312	50	120.3	3.67	3.48	139.2	14.78	344.3	48.2	4.83
		24	.375	13.250	55	119.7	3.67	3.47	137.8	16.09	372.8	53.2	4.82
		40	.438	13.124	63	118.5	3.67	3.44	135.3	18.88	429.8	61.4	4.80
		X-Gp.	.500	13.000	72	117.4	3.67	3.40	132.7	21.21	483.8	68.1	4.79
		60	.560	12.814	88	116.9	3.67	3.38	129.8	24.88	562.4	80.3	4.74
		—	.625	12.750	99	116.3	3.67	3.34	127.1	28.29	668.8	94.1	4.73
		80	.750	12.500	127	115.2	3.67	3.27	122.1	31.22	887.8	98.2	4.69
		—	.875	12.250	129	115.1	3.67	3.21	117.6	36.08	983.1	111.4	4.66
		100	.937	12.125	131	115.0	3.67	3.17	115.8	38.47	1033.8	117.2	4.63
		—	1.000	12.000	139	114.0	3.67	3.14	113.1	40.84	1088.0	124.0	4.61
		120	1.095	11.914	151	112.9	3.67	3.09	109.4	44.32	1229.8	132.8	4.59
		—	1.125	11.750	159	112.0	3.67	3.08	108.4	48.50	1353.3	139.8	4.57
		140	1.250	11.500	171	110.0	3.67	3.01	103.6	50.07	1427.6	146.9	4.53
		—	1.375	11.250	189	108.1	3.67	2.94	99.4	54.54	1590.0	157.1	4.49
		160	1.406	11.188	190	108.0	3.67	2.93	98.3	55.83	1616.0	159.0	4.48
		—	1.500	11.000	200	107.0	3.67	2.88	95.0	58.90	1666.0	168.0	4.45
16 400	16.000 406.4	10 Ga.	.134	15.732	25	84.3	4.19	4.12	194.4	8.66	210	28.3	5.81
		5 Ga.	.164	15.672	28	103.9	4.19	4.10	192.6	9.16	228	32.0	5.80
		—	.168	15.624	32	103.9	4.19	4.09	192.6	9.29	264	36.7	5.59
		5 Ga.	.164	15.612	33	103.0	4.19	4.09	191.4	9.60	261	37.6	5.59
		API	.219	15.580	37	123.0	4.19	4.07	190.2	10.88	339	43.3	5.59
		3 Ga.	.239	15.532	40	122.0	4.19	4.06	189.2	11.83	368	45.9	5.57
		10	.250	15.500	42	121.1	4.19	4.06	189.6	12.40	385	46.1	5.57
		API	.261	15.438	47	121.2	4.19	4.04	187.6	13.80	430	53.8	5.56
		20	.312	15.378	52	120.1	4.19	4.03	186.6	15.40	474	58.2	5.55
		API	.344	15.312	57	119.3	4.19	4.01	184.1	16.84	519	64.8	5.54
		24	.375	15.250	65	118.1	4.19	4.00	182.6	18.41	563	70.3	5.53
		API	.438	15.124	73	117.2	4.19	3.98	180.6	21.42	680	81.2	5.51
		X-Gp.	.500	15.000	83	116.3	4.19	3.93	176.7	24.35	732	91.5	5.49
		—	.625	14.750	123	114.1	4.19	3.88	170.6	30.19	983	111.7	5.44
		60	.658	14.688	128	113.4	4.19	3.88	169.4	31.82	1033	116.6	5.43
		—	.750	14.500	132	113.5	4.19	3.80	165.1	35.93	1047	120.9	5.40
		80	.843	14.314	137	112.7	4.19	3.78	160.6	40.14	1157	144.8	5.37
		—	.875	14.250	141	112.0	4.19	3.73	159.9	41.88	1182	149.0	5.36
		—	1.000	14.000	183	108.7	4.19	3.68	153.6	47.12	1331	186.4	5.31
		120	1.091	13.908	189	108.0	4.19	3.68	152.8	48.49	1396	170.7	5.30
		—	1.125	13.750	179	104.4	4.19	3.60	148.8	52.57	1493	182.9	5.27
		140	1.218	13.584	193	102.8	4.19	3.58	144.8	58.58	1596	194.8	5.24
		—	1.250	13.500	197	102.1	4.19	3.53	143.1	57.82	1596	190.3	5.23
		—	1.375	13.250	219	100.8	4.19	3.47	137.6	63.17	1704	213.0	5.19
		160	1.406	13.124	224	100.8	4.19	3.44	136.3	68.79	1761	220.1	5.17
		—	1.500	13.000	232	100.4	4.19	3.40	132.7	75.33	1816	227.0	5.16
		180	1.593	12.814	248	100.0	4.19	3.38	129.8	72.10	1903	236.8	5.12

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

**Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-
continuación-**

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam.	(3) Designa- tion	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) WL of Water per Ft of Pipe	(8) Sq Ft Outside Surface per ft	(9) Sq Ft Inside Surface per ft	(10) Flow Area in. ²	(11) Area of Metal in. ²	(12) Moment of Inertia in. ⁴	(13) Section Modulus in. ³	(14) Radius of Gyration in.
	D			d					a	A	I	Z	R
18 450	18.000 457	10 Ga.	.134	17.732	26	107.1	4.71	4.64	346.9	7.23	300	33.4	6.32
		8 Ga.	.104	17.672	31	106.3	4.71	4.63	345.3	9.19	300	40.8	6.31
		6 Ga.	.194	17.612	37	105.6	4.71	4.61	343.6	10.65	420	47.2	6.29
		3 Ga.	.239	17.523	45	104.5	4.71	4.59	341.1	13.34	528	56.4	6.28
		10	.250	17.500	47	104.0	4.71	4.58	341.0	13.06	550	61.1	6.28
		API	.281	17.438	49	104.0	4.71	4.56	340.0	14.49	570	63.4	6.27
		30	.312	17.375	59	102.5	4.71	4.55	337.1	17.36	679	75.5	6.25
		API	.344	17.312	69	102.0	4.71	4.53	335.4	19.08	744	82.8	6.24
		Std.	.375	17.250	71	101.2	4.71	4.51	333.7	20.76	807	89.8	6.23
		API	.406	17.188	76	100.6	4.71	4.50	332.0	22.44	869	96.8	6.22
		30	.439	17.124	82	99.5	4.71	4.48	329.5	24.95	933	107.0	6.21
		X-Gtg	.500	17.000	90	98.2	4.71	4.45	327.0	27.49	1023	117.0	6.19
		40	.562	16.879	109	97.2	4.71	4.42	324.0	30.85	1177	132.9	6.17
		--	.635	16.750	119	95.8	4.71	4.39	320.5	34.15	1290	143.2	6.14
		60	.750	16.500	132	92.5	4.71	4.32	313.9	40.64	1515	168.3	6.10
		--	.975	16.250	160	89.9	4.71	4.25	307.4	47.07	1730	192.3	6.06
		90	.997	16.125	171	88.5	4.71	4.22	304.2	50.29	1834	203.6	6.04
		--	1.000	16.000	182	87.2	4.71	4.19	301.1	53.41	1925	215.0	6.02
		--	1.125	15.750	203	84.5	4.71	4.12	294.9	59.64	2133	237.0	5.99
		120	1.188	15.688	208	83.7	4.71	4.11	293.3	61.18	2182	242.3	5.97
		--	1.250	15.500	224	81.6	4.71	4.06	288.7	66.76	2319	257.7	5.94
		120	1.375	15.250	244	79.2	4.71	3.99	282.7	71.82	2455	277.5	5.90
		--	1.500	15.000	269	76.6	4.71	3.93	276.7	77.75	2665	298.5	5.86
		140	1.562	14.879	275	75.3	4.71	3.89	273.9	80.66	2750	302.5	5.84
		160	1.781	14.438	309	71.0	4.71	3.78	263.7	90.75	3020	335.5	5.77
20 500	20.000 508	10 Ga.	.134	19.732	28	132.6	5.24	5.17	399.8	8.38	413	41.3	7.22
		8 Ga.	.104	19.672	35	131.9	5.24	5.15	398.9	10.22	503	50.3	7.21
		6 Ga.	.194	19.612	41	131.0	5.24	5.12	397.1	12.07	562	56.2	7.20
		3 Ga.	.239	19.523	50	129.6	5.24	5.11	396.3	14.94	725	72.5	6.99
		10	.250	19.500	53	130.0	5.24	5.11	399.0	15.22	759	75.9	6.99
		API	.281	19.438	59	128.6	5.24	5.08	396.9	17.41	846	84.6	6.97
		API	.312	19.375	66	128.1	5.24	5.08	395.0	19.36	927	92.7	6.95
		API	.344	19.312	72	127.0	5.24	5.06	392.9	21.24	1005	102.6	6.95
		API	.375	19.250	79	126.0	5.24	5.04	391.1	23.12	1113	111.3	6.94
		API	.406	19.188	85	125.4	5.24	5.02	389.2	24.99	1200	120.0	6.93
		API	.439	19.124	92	125.1	5.24	5.01	388.0	26.95	1280	128.0	6.92
		X-Gtg	.500	19.000	105	122.9	5.24	4.97	383.5	30.63	1457	145.7	6.90
		40	.562	18.914	123	120.4	5.24	4.89	379.0	36.15	1704	170.4	6.89
		--	.635	18.780	129	119.5	5.24	4.91	376.1	38.04	1787	178.7	6.88
		60	.812	18.579	147	114.9	5.24	4.81	369.2	46.95	2257	225.7	6.79
		--	.875	18.280	179	113.2	5.24	4.78	361.6	52.67	2459	245.9	6.77
		--	1.000	18.000	203	110.5	5.24	4.71	354.5	59.69	2752	275.2	6.73
		90	1.031	17.938	209	109.4	5.24	4.69	352.7	61.44	2771	277.1	6.72
		--	1.125	17.750	227	107.9	5.24	4.65	347.4	66.71	2981	298.1	6.69
		--	1.250	17.500	253	104.2	5.24	4.58	340.5	73.69	3249	324.9	6.64
		120	1.281	17.438	259	103.4	5.24	4.56	339.9	75.34	3317	331.7	6.63
		--	1.375	17.250	274	101.9	5.24	4.52	332.7	80.45	3558	355.8	6.60
		--	1.500	17.000	297	98.3	5.24	4.45	327.0	87.16	3755	375.5	6.58
		140	1.750	16.500	342	92.6	5.24	4.32	313.9	100.33	4217	421.7	6.49
		160	1.968	16.064	379	87.6	5.24	4.21	302.7	111.49	4585	458.6	6.41

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

**Tabla A8.6.-Características de las tuberías (normas ASME, ANSI, API)-
continuación-**

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam. in	(3) Design- ation	(4) Wall Thick- ness in	(5) Inside Diam. in	(6) Weight per Foot	(7) Vol. of Water per ft of Pipe	(8) Sq. ft Outside Surface per ft	(9) Sq. ft Inside Surface per ft	(10) Flow Area in. ² in	(11) Area of Metal in. ² in	(12) Moment of Inertia in. ⁴ in	(13) Section Modulus in. ³ in	(14) Radius of Gyration in.
22 553	22.000 556	8 Ga.	.194	21.672	35	159.9	5.76	5.67	385.9	11.25	671	81.0	7.72
		6 Ga.	.194	21.672	45	159.9	5.76	5.66	385.9	13.29	792	111.8	7.71
		5 Ga.	.230	21.522	55	157.7	5.76	5.53	383.9	19.34	967	147.9	7.59
		API	.250	21.500	65	157.4	5.76	5.63	383.1	17.18	1010	131.8	7.89
		API	.281	21.438	85	156.5	5.76	5.61	381.2	19.17	1131	152.8	7.88
		API	.312	21.376	105	155.9	5.76	5.60	359.9	21.39	1250	173.6	7.87
		API	.344	21.312	125	154.7	5.76	5.58	358.7	23.43	1373	194.8	7.86
		API	.375	21.250	145	153.7	5.76	5.56	354.7	25.49	1490	215.4	7.85
		API	.406	21.188	165	152.9	5.76	5.55	352.9	27.54	1607	236.1	7.84
		API	.436	21.124	185	151.9	5.76	5.53	350.5	29.57	1725	256.6	7.82
		API	.500	21.000	225	150.2	5.76	5.50	346.4	33.77	1951	297.5	7.81
		API	.562	20.876	265	148.5	5.76	5.43	338.2	41.87	2400	358.6	7.58
		API	.625	20.750	305	147.1	5.76	5.37	330.1	50.07	2850	419.7	7.52
		API	.687	20.625	345	145.8	5.76	5.30	322.1	58.27	3300	480.8	7.47
		API	.750	20.500	385	144.5	5.76	5.24	314.2	66.47	3750	541.9	7.43
		API	.812	20.376	425	143.3	5.76	5.17	306.4	74.67	4200	603.0	7.39
		API	.875	20.250	465	142.1	5.76	5.10	298.5	82.87	4650	664.1	7.35
		API	.937	20.125	505	140.8	5.76	5.04	291.3	91.07	5100	725.2	7.31
		API	1.000	20.000	545	139.6	5.76	4.97	283.9	99.27	5550	786.3	7.27
		8 Ga.	.194	21.672	45	159.9	5.76	5.67	440.1	13.29	671	111.8	8.43
		6 Ga.	.194	21.672	55	159.9	5.76	5.66	437.9	14.51	792	131.8	8.42
		5 Ga.	.230	21.522	65	158.4	5.76	5.53	434.5	17.84	1010	152.8	8.40
		API	.250	21.500	75	157.3	5.76	5.49	436.3	19.87	1131	173.6	8.40
		API	.281	21.438	95	156.5	5.76	5.44	431.5	20.94	1250	194.8	8.39
		API	.312	21.376	115	155.9	5.76	5.42	430.0	23.00	1373	215.4	8.38
		API	.344	21.312	135	155.3	5.76	5.40	428.8	25.07	1490	236.1	8.38
		API	.375	21.250	155	154.7	5.76	5.39	424.8	27.13	1607	256.6	8.35
		API	.406	21.188	175	153.7	5.76	5.37	422.3	29.19	1725	277.2	8.34
		API	.436	21.124	195	152.9	5.76	5.35	420.3	31.25	1842	297.8	8.33
		API	.500	21.000	235	151.3	5.76	5.32	416.0	36.90	2100	358.9	8.31
		API	.562	20.876	275	149.7	5.76	5.25	411.2	44.10	2550	419.7	8.28
24 603	24.000 610	8 Ga.	.194	21.672	45	159.9	5.76	5.67	440.1	13.29	671	111.8	8.43
		6 Ga.	.194	21.672	55	159.9	5.76	5.66	437.9	14.51	792	131.8	8.42
		5 Ga.	.230	21.522	65	158.4	5.76	5.53	434.5	17.84	1010	152.8	8.40
		API	.250	21.500	75	157.3	5.76	5.49	436.3	19.87	1131	173.6	8.40
		API	.281	21.438	95	156.5	5.76	5.44	431.5	20.94	1250	194.8	8.39
		API	.312	21.376	115	155.9	5.76	5.42	430.0	23.00	1373	215.4	8.38
		API	.344	21.312	135	155.3	5.76	5.40	428.8	25.07	1490	236.1	8.38
		API	.375	21.250	155	154.7	5.76	5.39	424.8	27.13	1607	256.6	8.35
		API	.406	21.188	175	153.7	5.76	5.37	422.3	29.19	1725	277.2	8.34
		API	.436	21.124	195	152.9	5.76	5.35	420.3	31.25	1842	297.8	8.33
		API	.500	21.000	235	151.3	5.76	5.32	416.0	36.90	2100	358.9	8.31
		API	.562	20.876	275	149.7	5.76	5.25	411.2	44.10	2550	419.7	8.28
		API	.625	20.750	315	148.1	5.76	5.18	406.5	52.30	3000	480.8	8.27
		API	.687	20.625	355	146.5	5.76	5.12	401.8	60.50	3450	541.9	8.25
		API	.750	20.500	395	145.1	5.76	5.06	397.0	68.70	3900	603.0	8.22
		API	.812	20.376	435	143.7	5.76	5.00	392.3	76.90	4350	664.1	8.19
		API	.875	20.250	475	142.3	5.76	4.94	387.6	85.10	4800	725.2	8.15
		API	.937	20.125	515	140.9	5.76	4.88	383.0	93.30	5250	786.3	8.14
		API	1.000	20.000	555	139.5	5.76	4.82	378.3	101.50	5700	847.4	8.14
		API	1.125	19.750	635	137.1	5.76	4.72	371.5	119.70	6600	958.5	8.10
		API	1.250	19.500	715	134.7	5.76	4.62	364.7	137.90	7500	1069.6	8.07
		API	1.375	19.250	795	132.3	5.76	4.52	358.0	156.10	8400	1180.7	8.03
		API	1.500	19.000	875	130.0	5.76	4.42	351.2	174.30	9300	1291.8	7.97
		API	1.625	18.750	955	127.6	5.76	4.32	344.5	192.50	10200	1402.9	7.96
26 653	26.000 660	8 Ga.	.194	21.672	45	159.9	5.76	5.67	440.1	13.29	671	111.8	8.43
		6 Ga.	.194	21.672	55	159.9	5.76	5.66	437.9	14.51	792	131.8	8.42
		5 Ga.	.230	21.522	65	158.4	5.76	5.53	434.5	17.84	1010	152.8	8.40
		API	.250	21.500	75	157.3	5.76	5.49	436.3	19.87	1131	173.6	8.40
		API	.281	21.438	95	156.5	5.76	5.44	431.5	20.94	1250	194.8	8.39
		API	.312	21.376	115	155.9	5.76	5.42	430.0	23.00	1373	215.4	8.38
		API	.344	21.312	135	155.3	5.76	5.40	428.8	25.07	1490	236.1	8.38
		API	.375	21.250	155	154.7	5.76	5.39	424.8	27.13	1607	256.6	8.35
		API	.406	21.188	175	153.7	5.76	5.37	422.3	29.19	1725	277.2	8.34
		API	.436	21.124	195	152.9	5.76	5.35	420.3	31.25	1842	297.8	8.33
		API	.500	21.000	235	151.3	5.76	5.32	416.0	36.90	2100	358.9	8.31
		API	.562	20.876	275	149.7	5.76	5.25	411.2	44.10	2550	419.7	8.28

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.7.-Eficiencias de juntas máximas permisibles (ASME VIII-Div.I, tabla UW-12)

Tipo No.	Descripción de la Junta	Limitaciones	Categoría de la Junta	Prueba Radiográfica		
				(a) Pleno ²	(b) Local ²	(c) Ninguno
(1)	Junta a tope que se logran por soldadura doble o por otro medio el cual obtendrá la misma calidad de metal de soldadura depositado en las superficies de soldar interiores y exteriores para concordar con los requerimientos de UW-35. Las soldaduras que usen tira de respaldo que permanezcan en su lugar son excluidas.	Ninguna	A, B, C, y D	1.00	0.85	0.70
(2)	Junta a tope con soldadura simple con tira de respaldo diferente de aquellas incluidas en (1)	(a) Ninguna excepto como en (b) abajo	A, B, C, y D	0.90	0.80	0.65
		(b) Juntas a tope circunferenciales con un rebaje de placa; [Vea UW-13 (b) (4) y Fig. UW-13.1. excepto (d)]	A, B, y C	0.90	0.80	0.65
(3)	Junta a tope con soldadura simple sin el uso de tira de respaldo	Sólo juntas circunferenciales a tope, no mayores de 5/8 pulg. de grueso y no mayor de 24 pulg. de diámetro exterior	A, B y C	NA	NA	0.00
(4)	Junta de solape con filete pleno y doble	(a) Juntas longitudinales no mayores de 3/8 pulg. de grueso	A	NA	NA	0.55
		(b) Juntas circunferenciales no mayor de 5/8 pulg. de grueso	B y C	NA	NA	0.55
(5)	Juntas de solape con filete pleno simple con soldadura de tapón que concuerdan con UW-17	(a) Juntas circunferenciales ¹ para fijación de tapas no mayores de 24 pulg. de diámetro exterior a envoltantes no mayores de 1/2 pulg. de grueso	B	NA	NA	0.50
		(b) Juntas circunferenciales para la fijación de envoltantes de carnes no mayores de 5/8 pulg. de espesor nominal en que la distancia desde el centro de la soldadura de tapón hasta la orilla de la placa no sea menor que 1-1/2 veces el diámetro del agujero para el tapón.	C	NA	NA	0.50

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.8.-Factor Y

VALUES OF COEFFICIENT Y FOR $t < D/6$						
Materials	Temperature, °C (°F)					≥ 621 (1150 & Up)
	≤ 482 (900 & Lower)	510 (950)	538 (1000)	566 (1050)	593 (1100)	
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Other ductile metals	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cast iron	0.0	...	...	...	...	...

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.9.-Características de los tubos de los cambiadores

Tubo DE, plg	BWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg ²	Superficie por pie lin. pies ²		Peso por pie lineal, lb. de acero
					Exterior	Interior	
½	12	0.109	0.232	0.0023	0.1309	0.0748	0.403
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145	0.1963	0.1125	0.190
	10	0.134	0.432	0.182		0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.580	0.247	0.2618	0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1629	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314	0.3271	0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
	8	0.165	0.670	0.355		0.1754	1.81
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421	0.3925	0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	0.455		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	0.479		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546	0.3271	0.2183	0.890
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
	17	0.058	0.884	0.613		0.2314	0.639
	18	0.049	0.902	0.639	0.3925	0.2361	0.545
	8	0.165	0.920	0.665		0.2409	2.00
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800	0.3271	0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2859	1.13
	15	0.072	1.11	0.960	0.3925	0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
	17	0.058	1.13	1.01		0.2969	0.808
	18	0.049	1.15	1.04		0.3015	0.688
	8	0.165	1.17	1.075	0.3925	0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29	0.3271	0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	1.37
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
	16	0.065	1.37	1.47	0.3271	0.3587	1.09
	17	0.058	1.38	1.50		0.3623	0.978
	18	0.049	1.40	1.54		0.3670	0.831

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.10.-Número de tubos de los diferentes tipos de intercambiadores
(Process Heat Transfer.R.W.Serth)

<i>Table C.8 Tube Counts for 1.25-in. OD Tubes on 1⁹/₁₆-in. Triangular Pitch</i>											
Shell ID (in.)	TEMA L or M				TEMA P or S				TEMA U		
	Number of passes				Number of passes				Number of passes		
	1	2	4	6	1	2	4	6	2	4	6
8	15	10	8	12	13	10	4	0	6	4	6
10	27	22	16	12	18	20	8	12	14	12	12
12	38	36	26	24	33	26	26	18	28	20	18
13 ¹ / ₄	55	44	42	40	38	44	34	24	34	28	30
15 ¹ / ₄	66	64	52	50	57	58	48	44	52	48	40
17 ¹ / ₄	88	82	78	68	81	72	62	68	72	68	64
19 ¹ / ₄	117	106	98	96	100	94	86	80	90	84	78
21 ¹ / ₄	136	134	124	108	126	120	116	102	118	112	102
23 ¹ / ₄	170	164	146	148	159	146	132	132	148	132	120
25	198	188	166	168	183	172	150	148	172	160	152
27	237	228	208	192	208	206	190	180	200	188	180
29	268	266	242	236	249	238	224	220	242	228	216
31	312	304	284	276	291	282	262	256	282	264	250
33	357	346	322	324	333	326	298	296	326	308	292
35	417	396	372	364	372	368	344	336	362	344	336
37	446	446	422	408	425	412	394	384	416	396	384
39	506	490	472	464	478	468	442	432	472	444	428
42	592	584	552	544	558	546	520	512	554	524	510
45	680	676	646	632	646	634	606	596	636	624	592
48	788	774	736	732	748	732	704	696	736	708	692
54	1003	980	952	928	962	952	912	892	946	916	890
60	1237	1228	1188	1152	1194	1182	1144	1116	1176	1148	1116

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam.	(3) Designation	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) Vol. of Water per ft. of Pipe	(8) Sq. ft. Outside Surface per ft.	(9) Sq. ft. Inside Surface per ft.	(10) Flow Area in. ²	(11) Area of Metal in. ²	(12) Moment of Inertia in. ⁴	(13) Section Modulus in. ³	(14) Radius of Gyration in.
	D			d					a	A	I	Z	R
1 1/4 30	1.660 42.2	10G Std.	.120 .140	1.442 1.360	1.505 2.272	.1080 .6471	.434 .434	.3775 .3320	1.833 1.499	.8314 .6655	.1625 .1047	.1014 .2340	.8100 .5317
		X-50g	.191	1.279	2.968	.5552	.434	.3368	1.293	.8015	.2419	.2612	.6327
		190 XX-50g	.250 .352	1.160 .809	3.784 9.214	.4676 .2732	.434 .434	.3020 .2331	1.057 .6320	1.1070 1.2540	.2803 .3411	.3421 .4110	.6060 .4710
1 1/2 40	1.900 48.3	10G Std.	.120 .140	1.642 1.610	2.065 2.717	.6030 .8820	.497 .497	.4403 .4213	2.221 2.035	.813 .800	.3409 .3089	.2519 .3282	.6344 .6226
		X-50g	.220	1.260	3.931	.1018	.497	.3827	1.737	1.208	.3812	.4118	.6022
		190 XX-50g	.281 .400	1.317 1.160	4.802 6.408	.6082 .4117	.497 .497	.3510 .2903	1.435 .970	1.430 1.585	.4820 .6078	.5809 .6917	.5809 .5460
2 50	2.375 60.3	10G Std.	.120 .154	2.167 2.047	2.538 3.552	1.083 1.452	.622 .622	.5547 .5401	3.694 3.355	.775 1.375	.6033 .6657	.4213 .6060	.8034 .7371
		X-50g	.219	1.690	5.522	1.270	.622	.5274	2.953	1.477	.6670	.7310	.7366
		190 XX-50g	.280 .343 .430	1.878 1.649 1.563	5.873 7.400 9.029	1.138 .870 .769	.622 .622 .622	.4920 .4422 .3929	2.781 2.240 1.774	1.569 2.100 2.550	.6885 1.102 1.311	.6046 .6760 1.1040	.7868 .7260 .7327
2 1/2 60	2.875 73.0	10G Std.	.120 .229	2.640 2.460	3.00 5.79	2.390 2.072	.703 .703	.6903 .6402	5.433 4.738	1.338 1.704	.8878 1.530	.6812 1.064	.8920 .9474
		X-50g	.278	2.323	7.68	1.834	.703	.6065	4.238	2.254	1.924	1.310	.9241
		190 XX-50g	.376 .552	2.125 1.711	11.01 13.69	1.678 1.057	.703 .703	.5594 .4927	3.847 2.434	2.248 4.228	2.353 2.871	1.620 1.667	.8920 .8462
3 90	3.500 88.9	10G Std.	.120 .125 .126	3.260 3.250 3.188	4.35 4.52 5.28	3.02 3.80 2.40	.918 .918 .815	.629 .629 .629	6.340 6.330 7.832	1.772 1.329 1.539	1.621 1.900 2.238	1.041 1.088 1.313	1.160 1.165 1.164
		X-50g	.188	3.125	6.65	3.34	.918	.619	7.730	1.828	2.700	1.645	1.176
		190 XX-50g	.218 .250 .350	3.068 3.060 2.960	7.57 8.68 11.08	3.20 1.08	.918 .918 .918	.602 .785 .602	7.343 7.134 5.485	2.128 2.683 5.993	3.017 3.938 9.454	1.754 1.658 3.454	1.164 1.160 1.347
3 1/2 90	4.000 101.6	10G Std.	.120 .125 .150	3.760 3.750 3.668	4.97 5.18 6.41	4.81 4.79 4.83	1.047 1.047 1.047	.684 .682 .688	11.10 11.34 10.88	1.40 1.52 1.68	2.794 2.859 3.435	1.317 1.430 1.743	1.372 1.371 1.360
		X-50g	.220	3.548	9.11	4.28	1.047	.629	6.60	2.08	4.738	2.844	1.357
		190 XX-50g	.281 .319 .450	3.600 3.244 2.728	13.02 12.61 22.80	4.17 3.68 2.03	1.047 1.047 1.047	.619 .603 .583	6.60 6.60 5.84	2.08 2.08 0.72	5.931 6.230 8.848	2.861 3.140 4.804	1.350 1.367 1.210
4 100	4.500 114.3	10G Std.	.120 .125 .150	4.260 4.250 4.168	5.61 5.89 7.24	6.18 6.10 5.67	1.178 1.178 1.178	1.115 1.118 1.066	14.25 14.19 13.77	1.05 1.12 2.13	3.67 4.12 5.03	1.761 1.828 2.235	1.500 1.508 1.537
		X-50g	.188	4.124	8.56	5.80	1.178	1.062	13.39	2.52	5.88	2.660	1.525
		190 XX-50g	.218 .237 .312	4.062 4.025 3.870	13.02 13.78 14.00	5.62 5.61 5.12	1.178 1.178 1.178	1.063 1.065 1.019	12.95 12.73 11.30	2.94 3.17 4.11	6.77 7.23 8.06	3.867 3.214 4.060	1.518 1.510 1.462
4 1/2 110	4.813 122.3	10G Std.	.120 .125 .150	4.680 4.670 4.588	6.48 6.76 8.11	6.68 6.60 6.18	1.178 1.178 1.178	1.302 1.302 1.248	15.50 15.32 14.62	1.41 1.49 1.62	6.61 8.05 9.27	4.271 5.137 5.818	1.477 1.444 1.428
		X-50g	.219	4.538	11.02	6.02	1.178	1.029	13.28	2.62	8.28	3.927	1.418
		190 XX-50g	.281 .312 .430	4.475 4.438 4.342	22.80 27.64 31.62	5.62 5.28 4.62	1.178 1.178 1.178	.629 .629 .629	6.60 6.60 6.10	2.08 2.08 1.50	5.931 6.230 8.848	3.140 3.140 4.804	1.367 1.367 1.210

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)		
Nominal Pipe Size	Nominal Outside Diam.	Design- ation	Wall Thick- ness	Inside Diam.	Weight per Foot	Wt. of Water per ft. of Pipe	Sq. ft. Outside Surface per ft.	Sq. ft. Inside Surface per ft.	Flow Area in ²	Area of Metal in ²	Moment of Inertia in ⁴	Section Modulus in ³	Radius of Gyration in.
5 125	5.563 141.3	100 API	134 5.295	130 5.251	7.77 9.02	8.54 9.39	1.456 1.450	1.386 1.375	22.02 21.59	2.29 2.65	8.42 9.70	3.028 3.407	1.620 1.813
		150 API	188 5.187	180 5.143	10.90 12.51	9.16 10.54	1.456 1.456	1.356 1.321	21.13 20.01	3.17 4.33	11.49 15.36	4.129 5.451	1.902 2.078
		200 API	242 5.080	230 5.036	13.82 15.86	11.86 13.52	1.456 1.456	1.321 1.309	19.64 19.64	4.68 4.68	16.31 16.31	5.892 5.892	2.070 2.070
		250 API	296 4.972	282 4.928	16.74 18.78	14.39 16.05	1.456 1.456	1.286 1.276	18.16 18.67	5.15 5.64	17.81 19.28	6.402 6.922	2.090 2.090
		300 API	350 4.864	334 4.820	20.78 22.78	17.87 19.53	1.456 1.456	1.260 1.260	16.11 16.19	6.11 6.11	20.67 20.67	7.421 7.421	2.090 2.090
		350 API	404 4.756	386 4.712	24.78 26.78	21.48 23.14	1.456 1.456	1.235 1.235	14.35 14.61	7.95 8.73	25.34 30.03	9.253 10.930	2.090 2.090
		400 API	458 4.648	438 4.604	30.55 32.55	26.62 28.28	1.456 1.456	1.204 1.204	12.57 12.97	11.34 11.34	33.83 33.83	12.030 12.030	2.090 2.090
		450 API	512 4.540	490 4.496	36.52 38.52	31.49 33.15	1.456 1.456	1.179 1.179	10.81 10.81	9.73 9.73	40.03 40.03	14.030 14.030	2.090 2.090
		500 API	566 4.432	542 4.388	42.50 44.50	36.46 38.12	1.456 1.456	1.154 1.154	9.34 9.34	8.41 8.41	46.03 46.03	16.030 16.030	2.090 2.090
		550 API	620 4.324	594 4.280	48.48 50.48	41.44 43.10	1.456 1.456	1.129 1.129	8.04 8.04	7.49 7.49	51.03 51.03	18.030 18.030	2.090 2.090
		600 API	674 4.216	646 4.172	54.46 56.46	46.42 48.08	1.456 1.456	1.104 1.104	6.94 6.94	6.94 6.94	56.03 56.03	20.030 20.030	2.090 2.090
		650 API	728 4.108	698 4.064	60.44 62.44	51.40 53.06	1.456 1.456	1.079 1.079	5.94 5.94	5.94 5.94	61.03 61.03	22.030 22.030	2.090 2.090
6 150	6.625 168.3	100 API	134 6.417	130 6.373	7.25 8.20	14.02 15.70	1.734 1.734	1.680 1.680	32.34 31.75	2.13 2.73	11.33 14.38	3.42 4.34	2.38 2.29
		150 API	188 6.297	180 6.253	11.23 12.50	15.50 17.34	1.734 1.734	1.640 1.640	31.14 30.55	3.33 3.92	17.30 20.20	5.25 6.12	2.28 2.27
		200 API	242 6.187	230 6.143	15.02 16.05	19.05 20.54	1.734 1.734	1.620 1.620	30.10 29.51	4.41 5.01	22.00 25.56	6.84 7.71	2.27 2.26
		250 API	296 6.079	282 6.035	18.82 19.87	22.80 24.55	1.734 1.734	1.596 1.596	29.50 28.91	5.01 5.54	25.56 30.00	7.71 8.43	2.25 2.25
		300 API	350 5.971	334 5.927	22.62 23.67	26.80 28.55	1.734 1.734	1.571 1.571	28.28 27.69	5.13 5.74	30.51 35.51	8.33 10.14	2.24 2.22
		350 API	404 5.864	386 5.820	26.42 27.47	30.60 32.35	1.734 1.734	1.546 1.546	27.07 26.48	5.43 6.03	40.48 45.90	12.22 13.78	2.22 2.22
		400 API	458 5.756	438 5.712	30.22 31.27	34.40 36.15	1.734 1.734	1.521 1.521	25.85 25.26	5.73 6.33	45.90 51.32	13.78 15.34	2.19 2.18
		450 API	512 5.648	490 5.604	34.02 35.07	38.20 40.05	1.734 1.734	1.496 1.496	24.64 24.05	6.03 6.63	51.32 56.74	15.34 16.90	2.18 2.18
		500 API	566 5.540	542 5.496	37.82 38.87	41.90 43.65	1.734 1.734	1.471 1.471	23.43 22.84	6.33 6.93	56.74 62.16	16.90 18.46	2.17 2.17
		550 API	620 5.432	594 5.388	41.62 42.67	45.70 47.45	1.734 1.734	1.446 1.446	22.22 21.63	6.63 7.23	62.16 67.58	18.46 20.02	2.16 2.16
		600 API	674 5.324	646 5.280	45.42 46.47	49.50 51.25	1.734 1.734	1.421 1.421	21.01 20.42	6.93 7.53	67.58 72.99	20.02 21.58	2.15 2.15
		650 API	728 5.216	698 5.172	49.22 50.27	53.40 55.15	1.734 1.734	1.396 1.396	19.80 19.21	7.23 7.83	72.99 78.40	21.58 23.14	2.14 2.14
8 200	8.625 219.1	100 API	134 8.417	130 8.373	9.47 10.80	24.1 27.8	2.20 2.20	2.204 2.180	55.0 54.8	2.73 3.37	25.3 32.2	5.03 7.44	3.08 3.03
		150 API	188 8.297	180 8.253	13.23 14.40	33.8 37.5	2.20 2.20	2.172 2.161	54.1 53.5	4.33 5.03	39.1 44.5	9.03 10.30	2.98 2.98
		200 API	242 8.187	230 8.143	16.97 18.14	43.5 47.2	2.20 2.20	2.140 2.130	53.1 52.1	5.33 6.33	47.3 55.4	11.05 12.94	2.98 2.98
		250 API	296 8.079	282 8.035	20.77 21.94	53.1 56.8	2.20 2.20	2.112 2.102	51.8 51.2	6.33 7.23	55.4 63.3	12.94 14.89	2.98 2.96
		300 API	350 7.971	334 7.927	24.57 25.74	62.9 66.6	2.20 2.20	2.084 2.074	50.6 50.0	7.23 8.13	63.3 70.0	14.89 16.37	2.96 2.95
		350 API	404 7.864	386 7.820	28.37 29.54	72.7 76.4	2.20 2.20	2.056 2.046	49.4 48.7	8.13 9.14	70.0 78.1	16.37 18.27	2.95 2.94
		400 API	458 7.756	438 7.712	32.17 33.34	82.5 86.2	2.20 2.20	2.028 2.018	48.2 47.6	9.14 10.14	78.1 86.2	18.27 20.17	2.94 2.93
		450 API	512 7.648	490 7.604	35.97 37.14	92.3 96.0	2.20 2.20	2.000 1.990	47.0 46.4	10.14 11.14	86.2 94.3	20.17 22.07	2.93 2.92
		500 API	566 7.540	542 7.496	39.77 40.94	102.1 105.8	2.20 2.20	1.972 1.962	45.8 45.2	11.14 12.14	94.3 102.4	22.07 23.97	2.92 2.91
		550 API	620 7.432	594 7.388	43.57 44.74	111.9 115.6	2.20 2.20	1.944 1.934	44.6 44.0	12.14 13.14	102.4 110.5	23.97 25.87	2.91 2.90
		600 API	674 7.324	646 7.280	47.37 48.54	121.7 125.4	2.20 2.20	1.916 1.906	43.4 42.8	13.14 14.14	110.5 118.6	25.87 27.77	2.90 2.89
		650 API	728 7.216	698 7.172	51.17 52.34	131.5 135.2	2.20 2.20	1.888 1.878	42.2 41.6	14.14 15.14	118.6 126.7	27.77 29.67	2.89 2.88

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam.	(3) Design- ation	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) Wt. of Water per ft of Pipe	(8) Sqrt Outside Surface per ft	(9) Sqrt Inside Surface per ft	(10) Flow Area in. ²	(11) Area of Metal in. ²	(12) Moment of Inertia in. ⁴	(13) Section Modulus in. ³	(14) Radius of Gyration in.
10 280	10.750 273.0	12 Ga.	.104	10.642	11.93	37.9	2.81	2.78	87.3	3.43	46.3	9.16	3.73
		10 Ga.	.104	10.482	15.21	37.4	2.81	2.74	88.3	4.47	63.0	11.71	3.75
		8 Ga.	.104	10.422	18.58	37.0	2.81	2.73	89.3	5.45	76.4	14.22	3.74
		10S	.105	10.420	18.52	36.0	2.81	2.73	85.3	5.53	76.8	14.20	3.74
		API	.104	10.374	21.12	36.7	2.81	2.72	84.5	6.23	80.2	13.10	3.74
		8 Ga.	.104	10.382	21.85	36.8	2.81	2.71	84.3	6.43	80.7	13.58	3.73
		API	.203	10.344	22.86	36.5	2.81	2.71	84.0	6.71	83.3	13.30	3.73
		API	.218	10.310	24.50	36.2	2.81	2.70	83.4	7.24	100.6	13.70	3.72
		8 Ga.	.236	10.272	28.05	35.9	2.81	2.69	82.9	7.63	109.2	20.32	3.72
		10	.250	10.230	28.03	35.9	2.81	2.68	82.9	8.23	113.6	21.12	3.71
		API	.279	10.182	31.20	35.3	2.81	2.68	81.6	9.13	125.9	23.42	3.70
		10	.307	10.138	34.24	35.0	2.81	2.65	80.7	10.07	137.4	25.57	3.69
		API	.344	10.082	38.20	34.5	2.81	2.63	79.5	11.25	152.3	28.38	3.68
		Std.	.366	10.020	40.48	34.1	2.81	2.62	78.9	11.61	160.7	29.00	3.67
		API	.438	9.874	48.28	33.2	2.81	2.58	78.8	14.10	188.8	35.13	3.65
		X-50	.500	9.750	54.74	32.3	2.81	2.55	74.7	15.10	212.0	38.43	3.63
		80	.550	9.594	66.40	31.1	2.81	2.50	71.8	18.81	244.8	45.56	3.60
		100	.718	9.214	77.00	28.5	2.81	2.44	68.1	22.62	286.2	53.25	3.55
		-	.750	9.250	80.10	29.1	2.81	2.42	67.2	23.58	298.2	55.10	3.54
		120	.845	9.084	89.20	27.9	2.81	2.37	64.5	26.29	324.3	60.34	3.51
		140	1.000	8.750	104.20	26.1	2.81	2.29	60.1	30.63	367.8	68.43	3.48
		150	1.125	8.500	115.00	24.6	2.81	2.22	56.7	34.01	399.4	74.31	3.43
12 300	12.750 323.8	12 Ga.	.104	12.642	14.1	53.0	3.34	3.28	121.5	4.13	82.0	12.0	4.47
		10 Ga.	.104	12.482	18.1	53.0	3.34	3.27	122.4	5.31	101.7	16.0	4.43
		8 Ga.	.104	12.422	22.1	52.5	3.34	3.25	121.2	6.43	128.4	20.1	4.45
		10S	.180	12.380	24.2	52.2	3.34	3.24	120.5	7.11	140.4	22.0	4.44
		10 Ga.	.194	12.362	25.0	52.0	3.34	3.23	120.0	7.63	150.8	23.7	4.44
		API	.203	12.344	27.2	52.0	3.34	3.23	116.9	7.69	157.2	24.7	4.43
		API	.216	12.312	29.3	51.7	3.34	3.22	116.1	8.62	167.8	26.3	4.43
		8 Ga.	.239	12.272	32.0	51.3	3.34	3.21	116.3	9.33	183.8	28.8	4.42
		10	.250	12.260	33.4	51.3	3.34	3.12	116.0	9.84	192.3	30.2	4.42
		API	.281	12.188	37.4	50.6	3.34	3.19	116.7	11.01	214.1	33.6	4.41
		API	.312	12.138	41.5	50.1	3.34	3.17	115.5	12.18	239.8	37.0	4.40
		10	.330	12.090	43.8	49.7	3.34	3.16	114.8	12.68	248.5	39.0	4.39
		API	.344	12.062	45.5	49.7	3.34	3.15	114.5	13.49	259.0	40.7	4.39
		Std.	.375	12.000	49.6	48.9	3.34	3.14	113.1	14.58	279.3	43.8	4.37
		40	.400	11.938	53.0	48.2	3.34	3.13	111.9	15.74	300.3	47.1	4.37
		API	.438	11.874	57.5	48.2	3.34	3.11	111.0	16.65	321.0	50.4	4.35
		12.50	.466	11.760	64.4	46.0	3.34	3.09	109.4	19.24	381.6	58.7	4.33
		80	.562	11.628	73.2	46.0	3.34	3.04	106.2	21.52	450.5	62.8	4.31
		-	.625	11.600	80.9	44.8	3.34	3.01	103.8	23.81	438.7	68.8	4.29
		80	.687	11.378	88.6	44.0	3.34	2.99	101.6	26.03	473.2	74.6	4.27
		-	.750	11.260	98.2	43.1	3.34	2.94	98.4	28.27	510.7	80.1	4.25
		100	.845	11.084	106.0	41.0	3.34	2.90	96.1	31.63	591.6	86.1	4.22
		-	.875	11.000	110.6	41.1	3.34	2.89	95.0	32.64	578.5	90.7	4.21
		120	1.000	10.750	125.5	38.3	3.34	2.81	90.8	36.61	641.7	100.7	4.17
		140	1.125	10.600	140.0	37.5	3.34	2.75	86.6	41.08	700.7	106.6	4.13
		-	1.200	10.200	153.6	36.8	3.34	2.68	82.5	45.10	755.8	116.6	4.09
		150	1.312	10.128	161.0	34.9	3.34	2.65	80.5	47.14	781.3	122.6	4.07
		-	1.375	10.000	167.2	34.0	3.34	2.62	78.5	49.14	807.2	126.6	4.05
		-	1.500	9.750	186.4	32.4	3.34	2.55	74.7	53.01	853.8	133.6	4.01

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam.	(3) Design- ation	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per foot	(7) Wt. of Water per ft of Pipe	(8) Sq.ft. Outside Surface per ft	(9) Sq.ft. Inside Surface per ft	(10) Flow Area in ²	(11) Area of Metal in ²	(12) Moment of inertia in ⁴	(13) Section Modulus in ³	(14) Radius of Gyration in.
	D			d					a	A	I	Z	R
14 S60	14.000 555.8	10 Ga.	.134	13.732	20	84.2	3.67	3.59	146.1	5.84	146.4	20.1	4.08
		8 Ga.	.184	13.672	24	85.8	3.67	3.59	146.0	7.13	178.7	24.4	4.58
		6 Ga.	.194	13.612	25	85.1	3.67	3.59	146.5	8.41	208.6	27.7	4.88
		API	.210	13.600	31	82.8	3.67	3.55	144.8	9.10	216.2	30.9	4.87
		3 Ga.	.239	13.522	35	82.3	3.67	3.54	144.6	10.23	244.9	35.0	4.87
		10	.250	13.600	37	82.1	3.67	3.61	145.0	10.22	246.0	36.6	4.88
		API	.251	13.438	41	81.8	3.67	3.62	141.8	12.11	238.2	40.7	4.88
		20	.312	13.372	49	80.8	3.67	3.60	140.0	15.44	214.9	49.0	4.84
		API	.344	13.312	59	80.3	3.67	3.48	139.2	14.70	244.3	49.2	4.89
		Std.	.375	13.200	63	80.7	3.67	3.47	131.8	15.00	272.8	53.2	4.82
		40	.438	13.124	63	80.8	3.67	3.44	135.3	18.66	429.6	61.4	4.88
		X-Std.	.500	13.000	72	81.4	3.67	3.40	132.7	21.21	482.8	68.1	4.78
		80	.590	12.814	83	80.9	3.67	3.35	130.0	24.58	562.4	80.3	4.74
		—	.625	12.780	89	80.3	3.67	3.29	127.7	28.26	658.6	84.1	4.73
		100	.750	12.500	107	81.2	3.67	3.27	122.7	31.22	687.5	88.2	4.68
		—	.875	12.250	129	81.1	3.67	3.21	117.0	36.00	708.1	111.4	4.68
		120	.837	12.125	131	80.0	3.67	3.17	115.5	38.47	628.5	117.2	4.69
		—	1.000	12.000	159	80.0	3.67	3.14	111.1	40.84	688.0	124.0	4.61
		120	1.095	11.814	161	81.0	3.67	3.09	109.0	44.22	628.8	132.8	4.58
		—	1.125	11.750	166	81.0	3.67	3.08	108.4	45.50	658.3	135.8	4.57
16 400	16.000 456.4	10 Ga.	.134	15.732	23	84.3	4.19	4.12	184.4	6.68	210	26.3	5.01
		8 Ga.	.184	15.672	29	85.8	4.19	4.10	182.8	8.16	266	32.0	5.49
		—	.188	15.624	32	86.3	4.19	4.09	182.0	8.39	264	32.7	5.59
		6 Ga.	.194	15.612	33	85.0	4.19	4.09	181.4	9.63	301	37.8	5.58
		API	.218	15.502	37	82.5	4.19	4.07	180.2	10.00	300	42.3	5.58
		3 Ga.	.239	15.522	40	82.0	4.19	4.05	180.2	11.03	300	45.9	5.57
		10	.250	15.600	42	82.1	4.19	4.00	180.0	12.40	305	48.1	5.57
		API	.281	15.438	47	81.2	4.19	4.04	187.0	13.00	430	53.8	5.58
		20	.312	15.375	52	80.1	4.19	4.03	185.8	15.40	474	59.2	5.55
		API	.344	15.312	57	80.0	4.19	4.01	184.1	18.94	519	64.9	5.54
		Std.	.375	15.200	63	78.1	4.19	4.00	182.6	18.41	562	70.3	5.53
		API	.430	15.124	73	76.2	4.19	3.95	180.0	21.42	660	81.2	5.51
		X-Std.	.500	15.000	83	76.5	4.19	3.93	176.7	24.55	722	91.5	5.48
		80	.595	14.783	109	74.1	4.19	3.88	170.9	30.10	909	111.7	5.44
		—	.656	14.603	100	73.4	4.19	3.85	166.4	31.62	909	116.8	5.43
		—	.750	14.600	123	71.6	4.19	3.82	166.1	35.03	1017	125.0	5.43
		80	.845	14.314	137	66.7	4.19	3.75	160.9	40.14	1157	144.0	5.37
		—	.875	14.250	143	66.1	4.19	3.73	159.5	41.58	1162	146.0	5.38
		—	1.000	14.000	160	60.7	4.19	3.60	153.8	47.12	1311	166.4	5.31
		100	1.031	13.938	165	60.0	4.19	3.60	152.0	48.49	1300	170.7	5.38
		—	1.125	13.750	179	56.4	4.19	3.60	148.5	52.57	1433	182.0	5.27
160	16.000	120	1.215	13.584	193	52.6	4.19	3.55	144.5	58.56	1536	194.5	5.24
		—	1.250	13.500	197	52.1	4.19	3.53	143.1	57.62	1538	198.3	5.23
		—	1.375	13.250	218	58.8	4.19	3.47	137.9	63.17	1734	212.0	5.19
		140	1.438	13.124	224	56.0	4.19	3.44	136.3	65.70	1731	225.1	5.17
		—	1.600	12.800	252	57.4	4.19	3.40	132.7	81.23	1816	237.0	5.16
		160	1.669	12.614	246	56.9	4.19	3.35	130.0	79.10	1819	239.0	5.12

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam.	(3) Design- ation	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) Wt. of water per ft of Pipe	(8) 3 ft Outside Surface per ft	(9) Sq ft Inside Surface per ft	(10) Flow Area in ²	(11) Area of Metal in ²	(12) Moment of inertia in ⁴	(13) Section Modulus in ³	(14) Radius of Gyration in.
	C			d					a	A	I	Z	R
18 450	18.000 457	16 Ga.	.134	17.732	20	107.1	4.71	4.64	340.8	7.52	390	30.4	8.52
		8 Ga.	.164	17.672	31	105.3	4.71	4.63	343.3	9.70	395	40.6	8.51
		6 Ga.	.164	17.612	37	105.3	4.71	4.61	343.8	10.85	430	47.8	8.50
		3 Ga.	.239	17.522	45	104.5	4.71	4.59	341.1	13.34	528	58.4	8.48
		10	.209	17.540	47	104.5	4.71	4.58	341.3	13.45	530	61.1	8.48
		API	.281	17.438	40	104.0	4.71	4.56	343.3	14.45	570	63.4	8.47
		20	.312	17.375	50	102.5	4.71	4.55	337.1	17.38	670	75.5	8.45
		API	.344	17.312	65	102.0	4.71	4.53	335.4	18.08	744	82.8	8.44
		30	.375	17.250	73	101.2	4.71	4.51	333.7	20.70	837	95.0	8.43
		API	.405	17.188	70	100.5	4.71	4.50	332.3	22.44	890	106.6	8.42
		30	.438	17.124	82	99.5	4.71	4.48	329.5	24.95	983	107.1	8.41
		X-50	.500	17.000	83	99.2	4.71	4.45	327.3	27.46	1053	117.1	8.40
		40	.562	16.875	135	97.2	4.71	4.42	324.3	30.85	1177	138.6	8.37
		—	.625	16.750	115	95.8	4.71	4.38	322.3	34.15	1286	143.2	8.36
		50	.750	16.500	138	92.6	4.71	4.32	313.8	40.54	1518	168.3	8.30
		—	.875	16.250	140	90.9	4.71	4.25	307.4	47.07	1704	182.3	8.29
		50	.937	16.125	171	88.5	4.71	4.22	304.2	50.23	1834	203.1	8.24
		—	1.000	16.000	192	87.2	4.71	4.19	301.1	53.41	1938	215.1	8.22
		—	1.125	15.750	233	84.5	4.71	4.12	294.8	59.34	2133	237.1	8.18
		100	1.160	15.840	230	83.7	4.71	4.11	293.3	61.18	2182	242.1	8.17
		—	1.250	15.500	224	81.8	4.71	4.06	288.7	65.78	2318	257.7	8.14
		120	1.375	15.250	244	79.2	4.71	3.99	282.7	71.82	2498	277.5	8.10
		—	1.500	15.000	295	73.8	4.71	3.93	273.7	77.75	2688	298.5	8.08
		140	1.562	14.875	275	73.5	4.71	3.88	273.3	80.00	2758	305.1	8.04
		160	1.781	14.438	338	71.0	4.71	3.78	263.7	89.75	3028	335.2	8.07
20 500	20.000 508	16 Ga.	.134	19.732	28	122.3	5.24	5.17	305.8	8.98	413	41.3	7.92
		8 Ga.	.164	19.672	35	121.3	5.24	5.15	303.8	10.22	513	50.3	7.91
		6 Ga.	.164	19.612	41	121.0	5.24	5.13	302.1	12.07	592	58.2	7.90
		3 Ga.	.239	19.522	50	120.5	5.24	5.11	299.3	14.84	720	72.0	7.89
		10	.250	19.500	53	120.0	5.24	5.11	299.3	15.52	759	75.9	7.88
		API	.281	19.438	56	120.3	5.24	5.09	299.3	17.41	848	84.8	7.87
		API	.312	19.375	60	123.1	5.24	5.08	305.3	19.30	937	93.7	7.85
		API	.344	19.312	72	127.0	5.24	5.00	292.8	21.24	1028	102.8	7.80
		API	.375	19.250	70	128.0	5.24	5.04	301.1	23.12	1113	111.3	7.84
		API	.405	19.188	88	125.4	5.24	5.02	299.3	24.99	1208	120.8	7.83
		API	.438	19.124	92	125.1	5.24	5.01	298.3	26.25	1294	129.4	7.82
		X-50	.500	19.000	135	122.3	5.24	4.97	293.5	30.53	1457	145.7	7.80
		40	.562	18.875	133	120.4	5.24	4.93	273.3	36.15	1704	170.4	7.88
		—	.625	18.750	139	119.5	5.24	4.91	273.1	38.04	1767	176.7	7.85
		50	.687	18.375	157	114.9	5.24	4.81	265.2	48.85	2257	225.7	7.78
		—	.750	18.250	179	113.2	5.24	4.78	301.1	52.57	2406	240.6	7.77
		—	1.000	18.000	233	110.3	5.24	4.71	354.5	59.95	2705	270.5	7.73
		80	1.061	17.938	239	109.4	5.24	4.60	363.7	61.44	2771	277.1	7.72
		—	1.125	17.750	237	107.3	5.24	4.66	347.4	66.71	3081	308.1	7.69
		—	1.250	17.500	250	104.3	5.24	4.58	343.5	73.03	3248	324.8	7.64
		100	1.281	17.438	258	103.4	5.24	4.58	338.8	75.34	3517	351.7	7.63
		—	1.375	17.250	274	101.3	5.24	4.52	333.7	80.45	3508	350.8	7.60
		120	1.500	17.000	297	99.5	5.24	4.45	327.3	87.18	3755	375.5	7.58
		140	1.750	16.500	342	92.6	5.24	4.32	313.8	100.33	4217	421.7	7.48
		160	1.968	16.064	379	87.9	5.24	4.21	302.7	111.49	4588	458.8	7.41

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.11.-Diámetro nominal y características de tubos (API)-continuación-

(1) Nominal Pipe Size	(2) Nominal Outside Diam.	(3) Design- ation	(4) Wall Thick- ness	(5) Inside Diam.	(6) Weight per Foot	(7) Wt. of Water per Ft. of Pipe	(8) Sq. Ft. Outside Surface per Ft.	(9) Sq. Ft. Inside Surface per Ft.	(10) Flow Area in ²	(11) Area of Metal in ²	(12) Moment of Inertia in ⁴	(13) Section Modulus in ³	(14) Radius of Gyration in.
	0			1					A	A	I	Z	R
22 550	22.000	8 Ga.	.104	21.872	33	152.2	5.70	5.67	383.6	11.25	871	31.0	7.72
		8 Ga.	.104	21.872	45	152.3	5.76	5.68	383.8	13.19	750	71.8	7.71
		9 Ga.	.130	21.522	53	157.7	5.76	5.63	383.8	16.14	607	17.0	7.60
		API	.200	21.500	59	157.4	5.70	5.63	383.1	17.18	1010	31.8	7.60
		API	.286	21.438	66	158.5	5.76	5.61	381.8	19.17	1131	103.8	7.68
		API	.312	21.370	72	155.3	5.70	5.60	383.8	21.20	1250	113.0	7.67
		API	.344	21.312	82	154.7	5.76	5.59	383.7	23.40	1373	124.8	7.68
		API	.373	21.250	87	153.7	5.70	5.59	384.7	25.48	1490	135.4	7.60
		API	.401	21.188	94	152.9	5.76	5.55	382.6	27.54	1607	146.1	7.64
		API	.438	21.124	101	151.9	5.76	5.53	383.5	29.67	1725	156.8	7.62
		API	.500	21.000	115	150.3	5.76	5.50	383.4	38.17	1953	177.5	7.61
		—	.625	20.750	143	146.5	5.76	5.49	383.2	41.67	2430	216.2	7.58
		—	.750	20.500	170	143.1	5.70	5.37	383.1	50.17	2829	257.2	7.52
		—	.875	20.250	198	139.5	5.76	5.30	383.1	58.17	3248	304.0	7.47
		—	1.000	20.000	224	136.2	5.70	5.24	314.2	65.67	3645	331.4	7.43
24 650	24.000	8 Ga.	.104	23.872	42	180.3	6.28	6.20	443.1	12.28	872	72.7	8.43
		8 Ga.	.104	23.872	49	180.3	6.28	6.18	437.9	14.51	1008	95.7	8.42
		9 Ga.	.130	23.522	51	180.4	6.28	6.16	434.5	17.54	1280	100.0	8.40
		10	.200	23.500	53	180.3	6.28	6.15	435.6	18.67	1300	110.0	8.40
		API	.200	23.430	71	177.3	6.20	6.14	431.5	20.64	1472	123.7	8.30
		API	.312	23.370	79	180.9	6.28	6.12	433.6	23.20	1600	136.0	8.38
		API	.344	23.312	87	186.3	6.28	6.10	434.8	25.47	1790	146.1	8.38
		API	.373	23.250	93	183.3	6.20	6.09	424.8	27.63	1842	161.8	8.35
		API	.401	23.188	102	183.1	6.28	6.07	422.3	29.69	2045	174.6	8.34
		API	.438	23.124	110	182.1	6.28	6.05	423.6	32.42	2252	187.7	8.38
		X-40	.500	23.000	125	181.3	6.28	6.02	411.6	38.60	2560	213.0	8.31
		50	.560	22.878	141	178.5	6.28	5.99	411.6	41.40	2840	237.0	8.28
		—	.625	22.750	158	175.9	6.28	5.96	403.8	45.60	3137	261.4	8.27
		40	.687	22.625	171	174.2	6.28	5.92	401.1	50.30	3422	281.2	8.25
		—	.750	22.500	188	172.1	6.28	5.90	407.4	54.18	3704	304.8	8.20
		—	.875	22.350	218	168.8	6.28	5.82	381.8	65.57	4257	354.7	8.13
		60	.938	22.250	230	165.9	6.20	5.70	382.3	70.64	4682	387.7	8.15
		—	1.000	22.000	240	164.5	6.28	5.70	383.1	72.10	4758	398.0	8.14
		—	1.125	21.750	275	161.1	6.28	5.69	371.5	80.65	5502	441.8	8.10
		80	1.218	21.600	287	159.2	6.28	5.65	383.2	87.17	5978	472.8	8.07
		—	1.250	21.500	304	157.4	6.28	5.63	383.1	89.24	5797	483.0	8.05
		—	1.375	21.250	332	153.5	6.28	5.56	384.7	97.35	6275	523.9	8.01
		—	1.500	21.000	361	150.2	6.28	5.50	343.4	106.03	6740	581.7	7.97
		100	1.531	20.838	387	149.3	6.28	5.48	344.3	108.07	6847	576.6	7.95
		120	1.812	20.375	419	141.4	6.28	5.33	321.1	126.30	7823	651.0	7.87
		140	2.002	19.875	464	134.4	6.28	5.20	313.3	142.10	8507	718.0	7.79
		160	2.343	19.314	542	127.5	6.28	5.00	293.1	156.40	9407	794.1	7.70
26 850	26.000	8 Ga.	.104	25.872	48	224.4	6.81	6.72	517.8	13.31	1111	85.4	8.13
		8 Ga.	.104	25.872	51	223.4	6.81	6.70	513.2	15.33	1310	106.7	8.12
		9 Ga.	.130	25.522	59	221.5	6.81	6.68	511.8	18.34	1000	123.4	8.11
		API	.200	25.500	67	221.4	6.81	6.68	513.7	19.35	1640	126.0	8.10
		API	.286	25.438	77	220.3	6.81	6.68	504.3	22.30	1877	144.4	8.09
		API	.312	25.370	84	219.7	6.81	6.64	505.8	25.18	2098	156.7	8.08

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.12.-Espesor comercial de deflectores (TEMA, sección5)

Nominal Shell ID	Plate Thickness					
	Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.					
	12 (305) and Under	Over 12 (305) to 24 (610) Inclusive	Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive	Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive	Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive	Over 60 (1524)
6 - 14 (152-356)	1/16 (1.6)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)
15 - 28 (381-711)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)
29 - 38 (737-965)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	5/16 (7.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)
39 - 60 (991-1524)	1/4 (6.4)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)
61 - 100 (1549-2540)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.13.-Separación máxima entre deflectores (TEMA, sección 5)

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits ° F (° C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (315) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.14.-Espesores calorifugados de equipos (Cepsa)

TEMPERATURA DE OPERACIÓN °C	ESPESOR mm.
65 - 75	40
75 - 160	50
160 -180	60
180 - 310	80
310 - 450	120
450 - 650	150
650 - 750	180

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.15.-Factor de carga por viento (Megyesy, 1992)

Velocidad básica del viento, mph	70	80	90	100	110	120	130
Presión q_s , lb/pie ²	13	17	21	26	31	37	44

Tabla A8.16.-Factor de forma (Megyesy, 1992)

C_q = Coeficiente de presión (factor de forma):	
Torres cuadradas o rectangulares.....	1.4
Torres hexagonales u octagonales.....	1.1
Torres redondas o elípticas.....	0.8
(Si hay cualquier equipo conectado a la torre, se recomienda incrementar C_q hasta 0.9 para recipientes cilíndricos.)	

Tabla A8.17.-Coeficiente de factor por ráfagas (Megyesy, 1992)

Altura sobre el piso, pies	Coeficiente C_e	
	Exposición C	Exposición B
0- 20	1.2	0.7
20- 40	1.3	0.8
40- 60	1.5	1.0
60-100	1.6	1.1
100-150	1.8	1.3
150-200	1.9	1.4
200-300	2.1	1.6
300-400	2.2	1.8

Tabla A8.18.-Tabla de espesores comerciales para pared de recipientes

in	1/16	3/32	3/16	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2
mm	1,6	2,4	4,8	6,4	7,9	9,5	11,1	12,7
in	9/16	5/8	11/16	3/4	13/16	7/8	15/16	1
mm	14,3	15,9	17,5	19,1	20,6	22,2	23,8	25,4
in	1 1/16	1 1/8	1 3/16	1 1/4	1 5/16	1 3/8	1 7/16	1 1/2
mm	27,0	28,6	30,2	31,8	33,3	34,9	36,5	38,1

Tabla A8.19.-Distribución triangular de tubos en intercambiadores de calor

D, carcasa		Tubos: 3/4" P = 15/16"				Tubos: 3/4" P = 1"				Tubos: 1" P = 1 1/8"			
		número de pasos: n,				número de pasos: n,				número de pasos: n,			
(in)	(cm)	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
8	20,3	32	26	24	18	30	24	24		16	16	14	
10	25,4	66	47	42	36	62	40	36		32	26	24	
12	30,5	88	66	62	78	82	76	74	70	52	48	46	44
13 1/4	33,7	114	96	90	86	106	86	82	74	66	68	64	60
15 1/4	38,7	160	140	136	128	138	122	118	110	86	82	74	72
17 1/4	43,9	224	184	188	178	196	178	172	166	118	106	104	94
19 1/4	48,9	282	252	244	234	250	226	216	210	152	140	136	128
21 1/4	54,0	342	314	306	290	302	278	272	260	188	170	164	160
23 1/4	59,1	420	388	378	364	378	352	342	328	232	212	212	202
25	63,5	506	468	446	434	452	422	404	382	282	256	252	242
27	68,6	602	560	536	524	534	488	474	464	334	302	296	286
29	73,7	682	640	620	594	604	556	538	508	370	336	334	316
31	78,8	822	766	722	720	728	678	666	640	454	430	424	400
33	83,8	936	878	852	826	830	774	760	732	522	486	470	454
35	88,9	1056	1004	988	956	936	882	864	848	582	552	546	532
37	94,0	1200	1144	1104	1072	1044	1012	988	970	664	632	614	588
39	99,0	1330	1258	1248	1212	1178	1128	1100	1078	736	700	688	672

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.20.-Espesores comerciales en aceros

Chapas gruesas

Espesor		Peso (N/m ²)
(pulg.)	(mm)	
1/8	3.20	247.4
3/16	4.80	371.0
1/4	6.40	494.7
5/16	7.90	610.7
3/8	9.50	734.4
7/16	11.10	858.0
1/2	12.70	981.7
9/16	14.30	1106.4
5/8	15.90	1229.1
1 1/16	17.50	1352.8
3/4	19.10	1476.4
13/16	20.60	1592.4
7/8	22.20	1716.1
15/16	23.80	1839.7
1	25.40	1963.4
1 1/4	31.70	2460.4
1 1/2	38.10	2945.1
1 3/4	44.40	3432.1
2	50.80	3926.8
2 1/2	63.50	4908.6
3	76.20	5898.0

Chapas finas

Calibre B.W.G. (Birmingham Wire Gauge)

Espesor		Peso (N/m ²)
nº	(mm)	
10	3.40	282.8
11	3.05	235.8
12	2.76	213.3
13	2.41	198.3
14	2.10	182.3
15	1.83	141.5
16	1.65	127.5
17	1.47	113.6
18	1.24	95.9
19	1.07	82.7
20	0.89	68.8
21	0.81	62.6
22	0.71	54.9
23	0.63	48.7
24	0.56	43.3
25	0.51	39.4
26	0.46	35.6
28	0.38	27.8
30	0.30	23.2

Chapas finas

Calibre B.G. (Birmingham Gauge)

Espesor		Peso (N/m ²)
nº	(mm)	
10	3.10	239.8
11	2.76	213.3
12	2.45	189.4
13	2.19	169.3
14	1.94	150.0
15	1.73	133.7
16	1.55	119.8
17	1.38	106.7
18	1.23	95.1
19	1.09	84.3
20	0.97	75.0
21	0.86	66.5
22	0.77	59.5
23	0.69	53.3
24	0.61	47.2
26	0.54	41.7
28	0.48	37.1
28	0.38	29.4
30	0.30	23.2

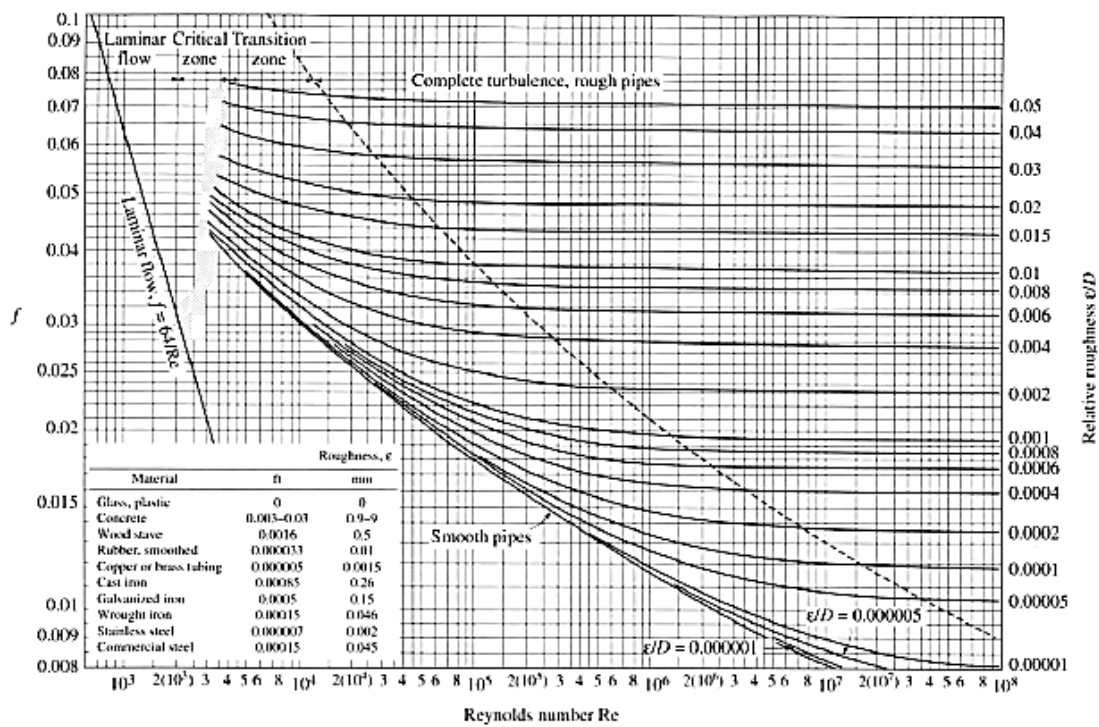
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla A8.21.-Tabla de espesores de aislante térmico en tuberías

Preformado de fibra de vidrio (80 Kg/m ³)													
Código NC-2 Clase II													
DÍAM. NOM. pulg/mm	Temperatura de Operación K (°C)												
	Hasta 60	Hasta 100	Hasta 150	Hasta 200	Hasta 250	Hasta 300	Hasta 350	Hasta 400	Hasta 450	Hasta 500	Hasta 550	Hasta 600	Hasta 650
3/8 / 13	38	51	64	76	89	102	102	102	114				
3/4 / 19	38	51	64	76	89	102	102	102	127	No aplica			
1 / 25	38	51	64	76	89	102	102	102	127				
1 1/8 / 38	38	51	64	89	102	102	102	114	152				
2 / 51	38	51	64	89	102	114	114	114	152				
2 1/4 / 64	38	51	64	89	102	114	114	127	152				
3 / 76	38	64	76	89	102	114	114	127	152				
4 / 102	38	64	76	89	114	127	127	127	165				
5 / 127	38	64	89	102	127	127	152	165	178				
6 / 152	38	64	89	102	127	127	152	165	191				
8 / 203	38	64	89	102	127	127	152	165	191				
10 / 254	38	64	89	102	127	152	165	191	191				
12 / 305	38	64	89	102	127	152	165	191	191				
14 / 358	38	64	89	102	127	152	165	191	203				
16 / 406	38	64	89	102	127	152	165	191	203				
18 / 457	38	64	89	102	127	152	165	191	203				
20 / 508	38	64	89	102	127	152	165	191	203				
22 / 559	38	64	89	102	127	152	165	203	203				
24 / 610	38	64	89	102	140	165	178	203	203				
26 / 660	38	64	89	102	140	165	178	203	216				
28 / 711	38	64	89	102	140	165	178	203	216				
30 / 762	38	64	89	102	140	165	178	203	216				
Notas:													
1.- Espesor termoisolante en mm.													
2.- El espesor del acabado no se incluye.													
3.- Temperatura ambiente = 298 K (25 °C).													
4.- Velocidad de aire = 10 000 m/h.													
5.- Emisividad = 0,4													

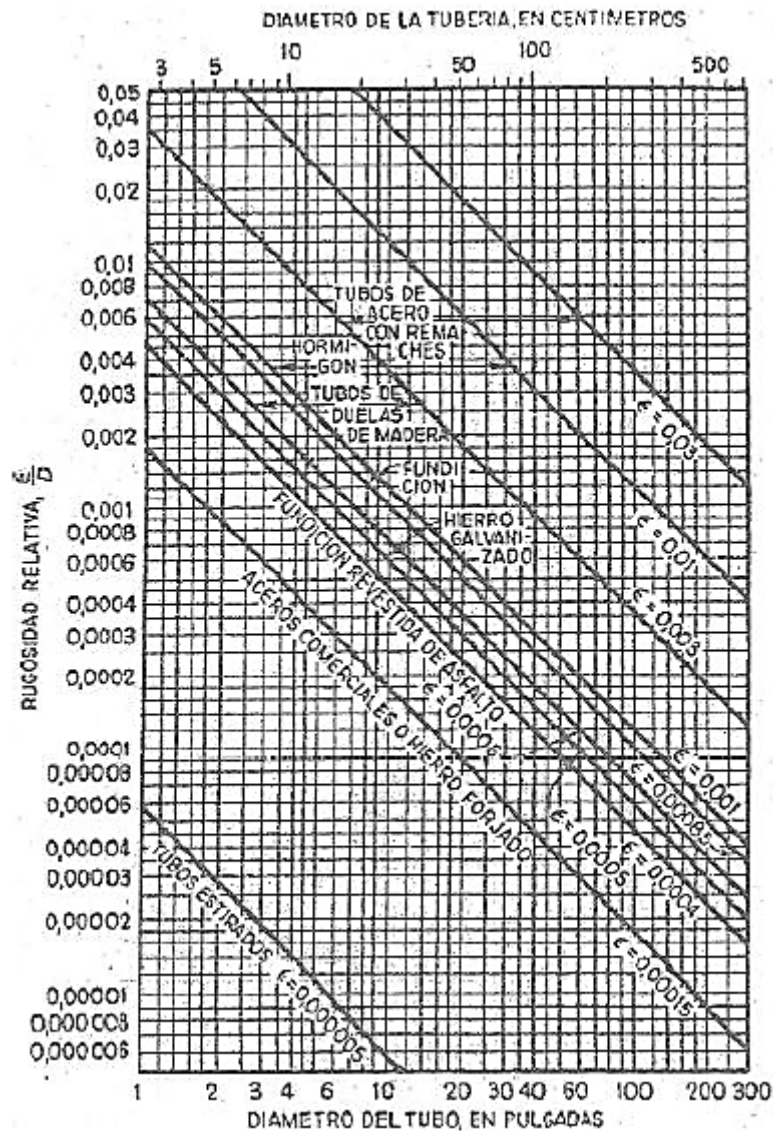
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Figura A8.1.-Gráfico de Moody



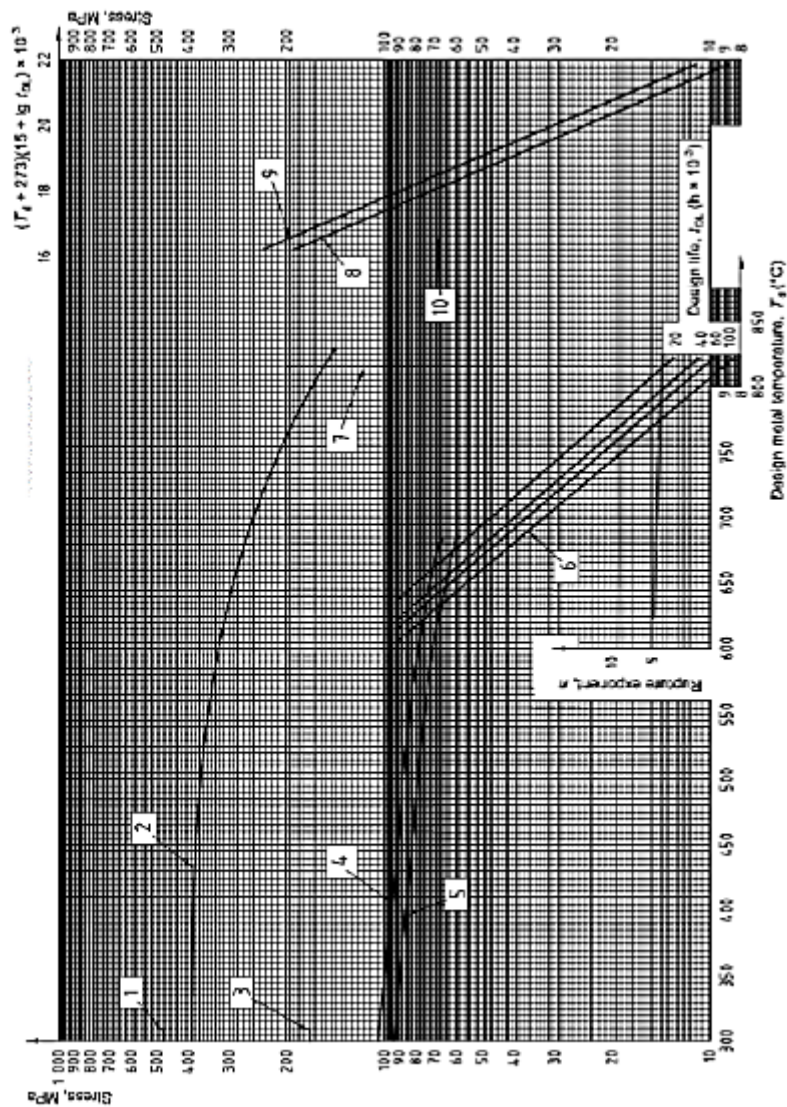
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Figura A8.2.-Diagrama para determinar la rugosidad relativa en materiales



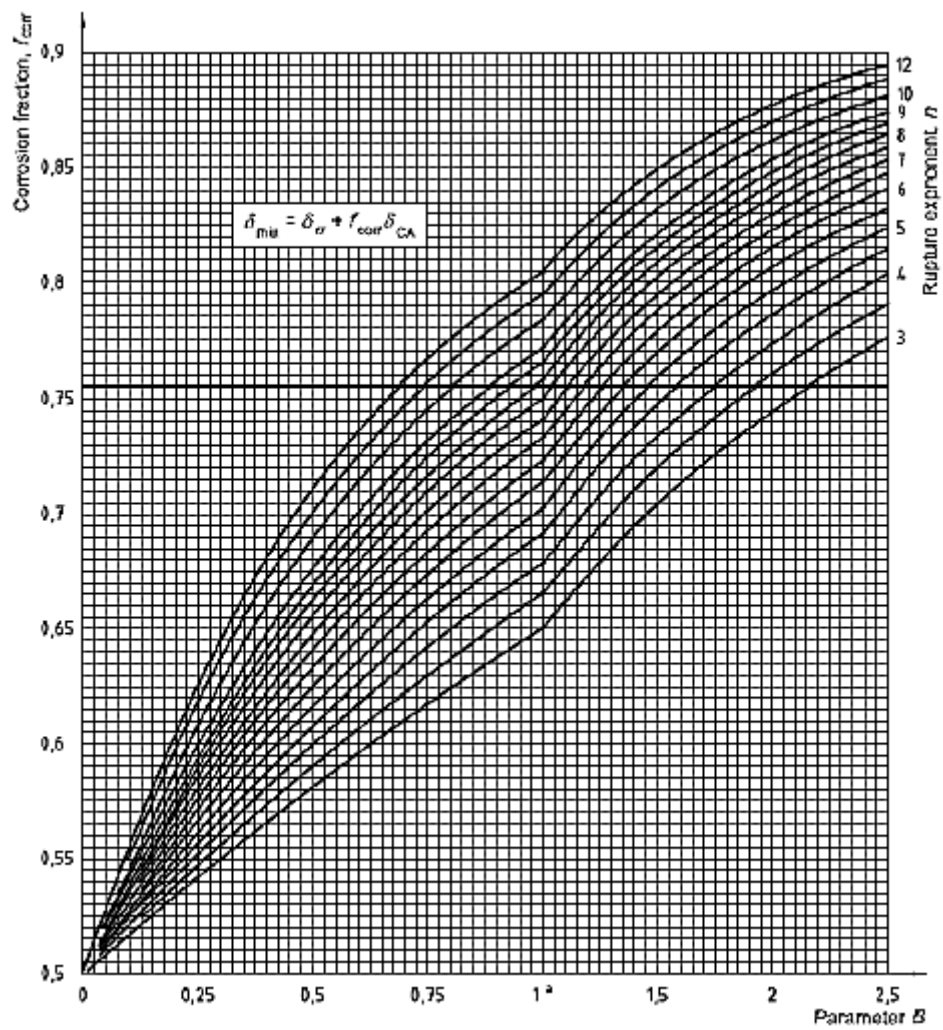
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

FiguraA8.3.-Tensiones de rotura del acero inoxidable 316L a la temperatura de diseño (API 530)



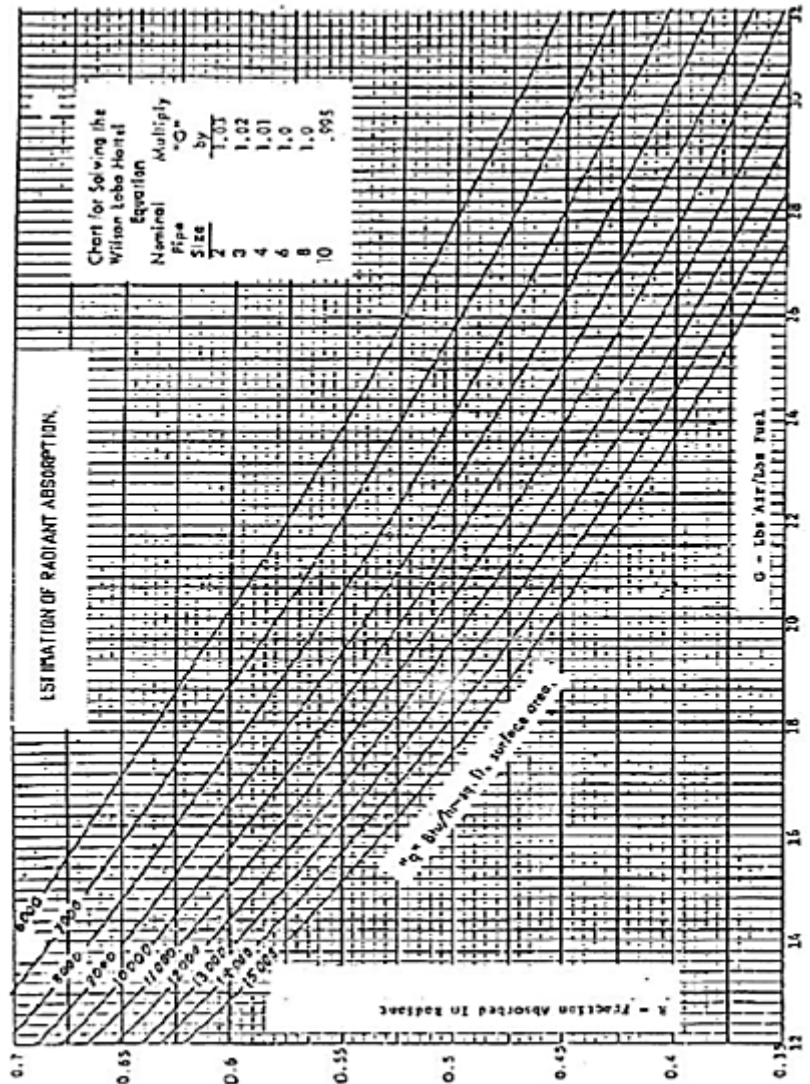
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Figura A8.4.-Factor de corrosión para tubos de hornos de procesos (API 530)



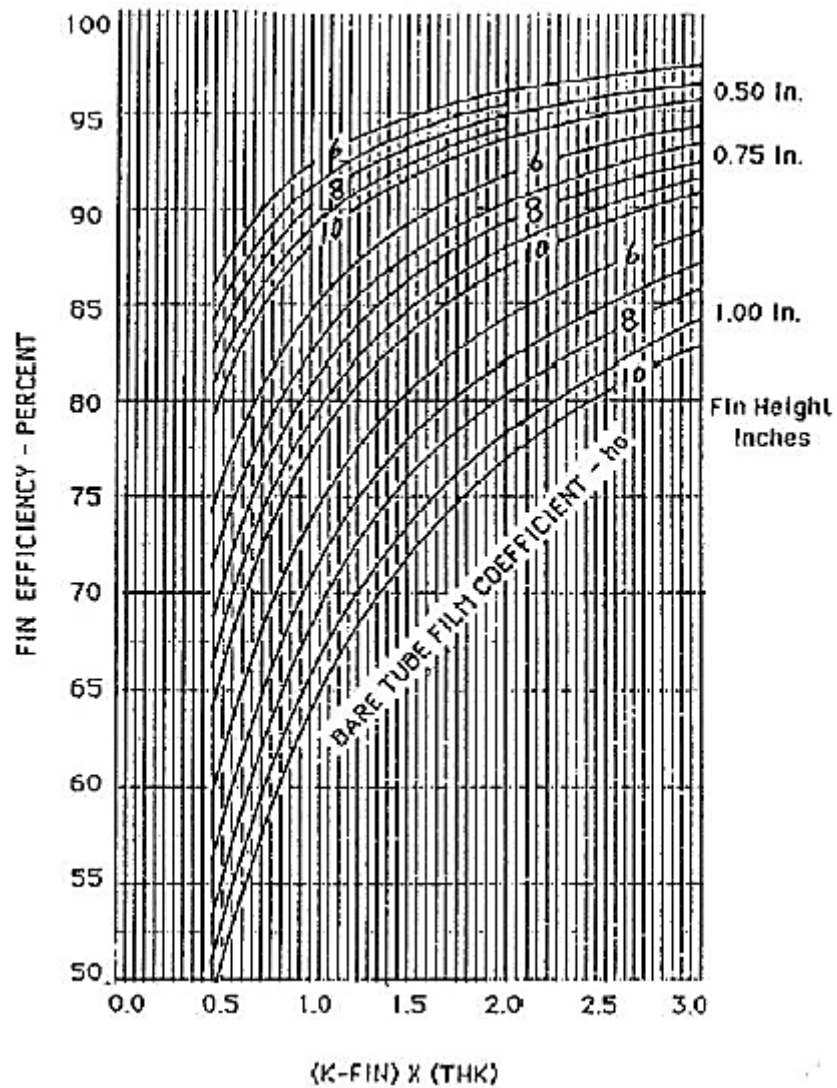
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Figura A8.5.-Fracción de absorción de calor en la zona de radiación
(DEI.Universidad de Salamanca)



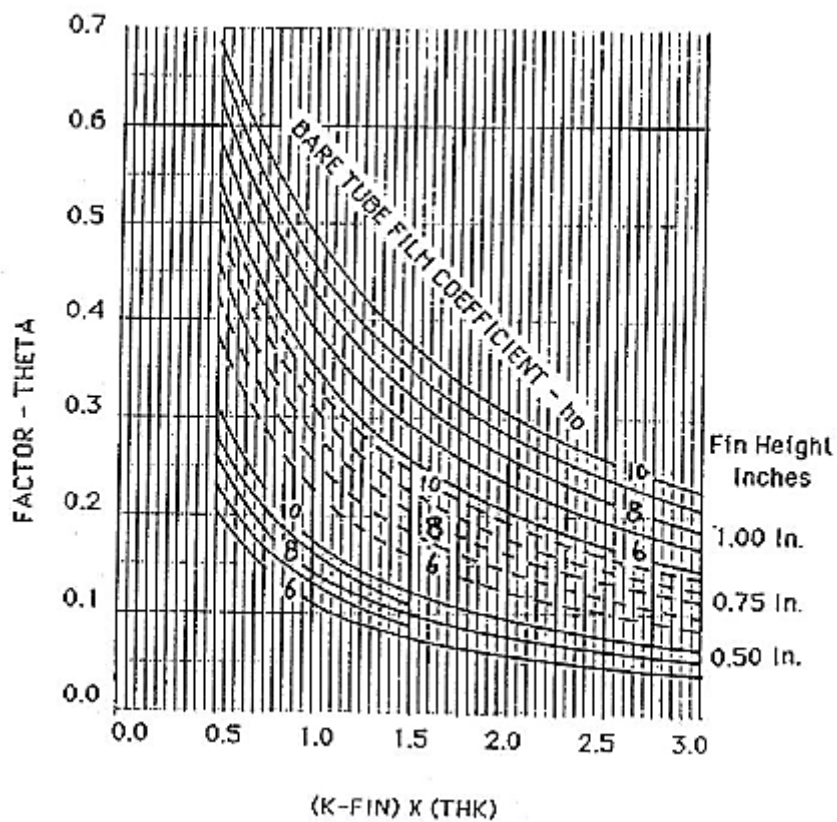
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Figura A8.6.-Eficiencia aleta como función de la conductividad y el espesor
(DEI.Universidad de Salamanca)



Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

FiguraA8.7.-Factor Teta para el horno de procesos (DEI.Universidad de Salamanca)



Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ANEXO 9.-CATÁLOGOS Y FICHAS DE SEGURIDAD

En el presente anexo se exponen tanto algunos catálogos que se han conseguido de los fabricantes como las fichas de seguridad correspondientes a los diferentes compuestos químicos que están presentes en este Proyecto Fin de Carrera.

THERMINOL® 66

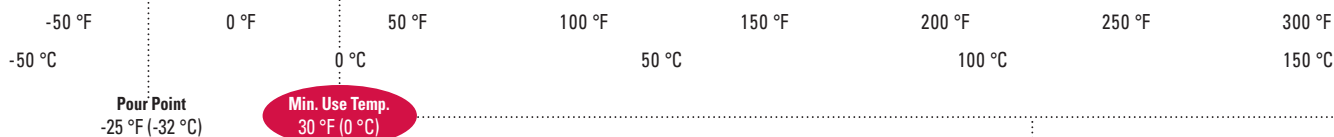
Heat Transfer Fluid by **Solutia**

Unique
High-temperature,
Low-pressure
Heat Transfer Fluid

30 °F to

650 °F





O P T I M U M

U S E R A N G E *

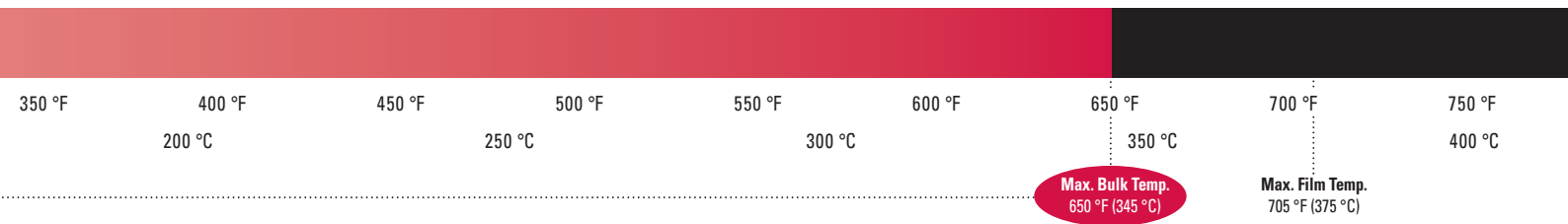
30 °F TO 650 °F (0 °C TO 345 °C)

Therminol® 66 synthetic heat transfer fluid offers outstanding high-temperature performance to 650 °F (345 °C), including excellent thermal stability and low vapor pressure. These properties result in reliable, consistent performance of heat transfer systems over long periods of time. Therminol 66 performance is proven through many years of industrial experience under a wide range of operating conditions. No heat transfer fluid material in the world has a higher degree of customer satisfaction than Therminol 66.

THERMINOL® 66

Heat Transfer Fluid by **Solutia**

66



TYPICAL
PROPERTIES*†

Appearance	Clear, pale yellow liquid
Composition	Modified terphenyl
Moisture Content, Maximum	150 ppm
Flash Point (ASTM D-92)	184 °C (363 °F)
Fire Point (ASTM D-92)	212 °C (414 °F)
Autoignition Temperature (ASTM E-659)	374 °C (705 °F)
Kinematic Viscosity, at 40 °C	29.6 mm²/s (cSt)
Kinematic Viscosity, at 100 °C	3.8 mm²/s (cSt)
Density at 25 °C	1005 kg/m³ (8.39 lb/gal)
Specific Gravity (60 °F/60 °F)	1.012
Coefficient of Thermal Expansion at 200 °C	0.000819/°C (0.000455/°F)
Average Molecular Weight	252
Pour Point	-32 °C (-25 °F)
Pumpability, at 2000 mm²/s (cSt)	-3 °C (27 °F)
Pumpability, at 300 mm²/s (cSt)	11 °C (52 °F)
Minimum Temperatures for Fully Developed Turbulent Flow (Re = 10000)	
10 ft/sec, 1-in tube	72 °C (162 °F)
20 ft/sec, 1-in tube	53 °C (128 °F)
Transition Region Flow (Re = 2000)	
10 ft/sec, 1-in tube	35 °C (96 °F)
20 ft/sec, 1-in tube	26 °C (78 °F)
Boiling Range, 10%	348 °C (658 °F)
Boiling Range, 90%	392 °C (738 °F)
Normal Boiling Point	359 °C (678 °F)
Heat of Vaporization at Maximum Use Temperature 345 °C	272 kJ/kg (117 Btu/lb)
Optimum Use Range	0-345 °C (30-650 °F)
Maximum Film Temperature	375 °C (705 °F)
Pseudocritical Temperature	569 °C (1056 °F)
Pseudocritical Pressure	24.3 bar (353 psia)
Pseudocritical Density	317 kg/m³ (19.8 lb/ft³)

* These data are based upon samples tested in the laboratory and are not guaranteed for all samples.
Write us for complete sales specifications for Therminol 66 fluid.
† Does not constitute an express warranty. See NOTICE on the back page of this bulletin.

PROPERTIES OF THERMINOL® 66

Temperature		Liquid Density			Liquid Heat Capacity		Liquid Enthalpy**		Heat of Vaporization	
°F	°C	lb/gal	lb/ft³	kg/m³	Btu/lb-°F [cal/g-°C]	kJ/kg-K	Btu/lb	kJ/kg	Btu/lb	kJ/kg
20	-7	8.56	64.0	1026	0.352	1.47	7.0	16.2	179.6	417.5
30	-1	8.53	63.8	1022	0.356	1.49	10.5	24.4	178.5	414.8
40	4	8.50	63.6	1019	0.361	1.51	14.1	32.7	177.3	412.2
60	16	8.44	63.1	1011	0.370	1.55	21.4	49.7	175.1	407.1
80	27	8.38	62.7	1003	0.379	1.58	28.9	67.1	173.0	402.0
100	38	8.32	62.2	997	0.388	1.62	36.5	84.9	170.8	397.1
120	49	8.26	61.8	989	0.397	1.66	44.4	103.2	168.7	392.2
140	60	8.19	61.3	982	0.406	1.70	52.4	121.8	166.7	387.5
160	71	8.13	60.8	974	0.415	1.74	60.6	140.9	164.7	382.8
180	82	8.07	60.4	967	0.424	1.78	69.0	160.5	162.7	378.3
200	93	8.01	59.9	960	0.434	1.81	77.6	180.4	160.8	373.8
220	104	7.94	59.4	952	0.443	1.85	86.4	200.8	158.9	369.3
240	116	7.88	59.0	944	0.452	1.89	95.3	221.6	157.0	365.0
260	127	7.82	58.5	937	0.462	1.93	104.5	242.8	155.2	360.6
280	138	7.75	58.0	929	0.471	1.97	113.8	264.5	153.3	356.4
300	149	7.69	57.5	921	0.480	2.01	123.3	286.6	151.5	352.1
320	160	7.62	57.0	914	0.490	2.05	133.0	309.2	149.7	347.9
340	171	7.56	56.5	906	0.500	2.09	142.9	332.2	147.9	343.8
360	182	7.49	56.1	898	0.509	2.13	153.0	355.6	146.1	339.6
380	193	7.43	55.6	890	0.519	2.17	163.3	379.5	144.3	335.4
400	204	7.36	55.1	882	0.528	2.21	173.7	403.8	142.5	331.2
420	216	7.29	54.5	874	0.538	2.25	184.4	428.6	140.7	327.0
440	227	7.22	54.0	866	0.548	2.29	195.2	453.8	138.9	322.8
460	238	7.15	53.5	857	0.558	2.33	206.3	479.6	137.0	318.5
480	249	7.08	53.0	849	0.568	2.38	217.6	505.7	135.2	314.2
500	260	7.01	52.5	840	0.578	2.42	229.0	532.3	133.3	309.8
520	271	6.94	51.9	832	0.588	2.46	240.7	559.4	131.3	305.3
540	282	6.87	51.4	823	0.598	2.50	252.5	587.0	129.4	300.7
560	293	6.79	50.8	814	0.608	2.54	264.6	615.0	127.4	296.0
580	304	6.72	50.2	805	0.618	2.59	276.8	643.5	125.3	291.2
600	316	6.64	49.7	796	0.628	2.63	289.3	672.5	123.2	286.3
620	327	6.56	49.1	786	0.639	2.67	302.0	701.9	121.0	281.2
640	338	6.48	48.5	777	0.649	2.72	314.9	731.9	118.7	276.0
650	345	6.44	48.2	772	0.655	2.74	321.4	747.0	117.6	273.3
660	349	6.40	47.9	767	0.660	2.76	328.0	762.3	116.4	270.5
680	360	6.32	47.3	757	0.671	2.81	341.3	793.2	113.9	264.9
700	371	6.23	46.6	747	0.682	2.85	354.8	824.7	111.4	259.0

* Maximum recommended bulk temperature 650 °F (345 °C).

† These data are based upon samples tested in the laboratory and are not guaranteed for all samples. Write us for complete sales specifications for Therminol 66 fluid.

** The liquid enthalpy basis is zero at 0 °F.

HEAT TRANSFER FLUID**†

Liquid Thermal Conductivity			Liquid Viscosity			Vapor Pressure				Temperature	
Btu/ ft-hr-°F	kcal/ m-hr-°C	W/m•K	lb/ft-hr	cSt [mm²/s]	cP [mPa•s]	psia	mm Hg	kgf/cm²	kPa	°F	°C
0.0685	0.1020	0.1185	10070	4060	4160					20	-7
0.0684	0.1018	0.1183	3820	1544	1579					30	-1
0.0683	0.1016	0.1181	1679	681	694					40	4
0.0681	0.1013	0.1177	456	186.3	188.4					60	16
0.0678	0.1009	0.1173	171.9	70.8	71.0					80	27
0.0675	0.1005	0.1168	81.2	33.7	33.6					100	38
0.0672	0.1001	0.1163	45.0	18.78	18.58					120	49
0.0669	0.0996	0.1158	27.9	11.74	11.53					140	60
0.0666	0.0991	0.1152	18.79	7.97	7.77	0.0016	0.085	0.00012	0.011	160	71
0.0662	0.0986	0.1145	13.48	5.76	5.57	0.0029	0.15	0.00021	0.020	180	82
0.0658	0.0980	0.1139	10.14	4.37	4.19	0.0051	0.26	0.00036	0.035	200	93
0.0654	0.0974	0.1132	7.91	3.44	3.27	0.0086	0.45	0.00061	0.060	220	104
0.0650	0.0967	0.1124	6.36	2.78	2.63	0.014	0.74	0.0010	0.098	240	116
0.0646	0.0961	0.1117	5.23	2.31	2.16	0.023	1.2	0.0016	0.16	260	127
0.0641	0.0954	0.1108	4.39	1.951	1.813	0.036	1.9	0.0025	0.25	280	138
0.0636	0.0946	0.1100	3.74	1.677	1.545	0.056	2.9	0.0039	0.38	300	149
0.0631	0.0939	0.1091	3.23	1.461	1.335	0.084	4.3	0.0059	0.58	320	160
0.0625	0.0931	0.1082	2.82	1.289	1.167	0.125	6.4	0.0088	0.86	340	171
0.0620	0.0922	0.1072	2.49	1.148	1.031	0.182	9.4	0.0128	1.26	360	182
0.0614	0.0914	0.1062	2.22	1.032	0.918	0.262	13.5	0.0184	1.80	380	193
0.0608	0.0905	0.1051	1.995	0.935	0.825	0.370	19.1	0.0260	2.55	400	204
0.0602	0.0895	0.1040	1.805	0.854	0.746	0.517	26.7	0.0363	3.56	420	216
0.0595	0.0886	0.1029	1.643	0.785	0.679	0.712	36.8	0.0501	4.91	440	227
0.0588	0.0876	0.1018	1.504	0.725	0.622	0.969	50.1	0.0681	6.68	460	238
0.0581	0.0865	0.1006	1.384	0.674	0.572	1.30	67.4	0.0916	8.98	480	249
0.0574	0.0855	0.0993	1.280	0.629	0.529	1.73	89.6	0.122	12.0	500	260
0.0567	0.0843	0.0980	1.188	0.591	0.491	2.28	118	0.160	15.7	520	271
0.0559	0.0832	0.0967	1.108	0.557	0.458	2.97	154	0.209	20.5	540	282
0.0552	0.0821	0.0954	1.037	0.527	0.429	3.84	199	0.270	26.5	560	293
0.0543	0.0809	0.0940	0.974	0.500	0.403	4.91	254	0.346	33.9	580	304
0.0535	0.0796	0.0926	0.918	0.477	0.379	6.24	323	0.439	43.0	600	316
0.0527	0.0784	0.0911	0.868	0.456	0.359	7.85	406	0.552	54.2	620	327
0.0518	0.0771	0.0896	0.822	0.438	0.340	9.81	508	0.690	67.7	640	338
0.0514	0.0764	0.0888	0.801	0.429	0.331	10.9	566	0.769	75.4	650	345
0.0509	0.0757	0.0880	0.781	0.421	0.323	12.2	630	0.856	83.9	660	349
0.0500	0.0744	0.0865	0.744	0.407	0.308	15.0	776	1.05	103	680	360
0.0491	0.0730	0.0848	0.711	0.393	0.294	18.4	949	1.29	127	700	371

TECHNICAL SERVICE HOTLINE (800) 433-6997



PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS

Therminol 66 fluid is designed for use in non-pressurized/low-pressure, indirect heating systems. It delivers efficient, dependable, uniform process heat with no need for high pressures. The high boiling point of Therminol 66 helps reduce the volatility and fluid leakage problems associated with other fluids.

While Therminol 66 has a relatively high flash point, it is not classified as a fire-resistant heat transfer fluid. Consequently, the use of protective devices may be required to minimize fire risk. The insurer of your property should be consulted relative to this matter.

The recommended maximum bulk (650 °F/345 °C) and film (705 °F/375 °C) temperatures are based on detailed thermal studies. Operation at or below these temperature maximums provides long service life under most operating conditions.

THERMINOL® 66

Heat Transfer Fluid by Solutia

Solutia recommends that systems utilizing Therminol 66 fluid should be blanketed with an inert atmosphere. Inert gas blanketing minimizes fluid oxidation and helps maximize fluid life. A system pressure relief device also should be provided.

Therminol 66 is non-corrosive to metals commonly used in the design of heat transfer systems.

Actual fluid life is quite dependent on system design and operation. As fluid ages, the formation of volatile (low-boiling) products and high-boiling compounds may result. Volatile products should be vented from the system to a non-hazardous area away from personnel and sources of ignition. The high-boiling compounds are generally soluble in the fluid. Significant overheating or fluid contamination will accelerate this decomposition and may result in separation of the high-boiling compounds as solids (tar, coke, etc.). These solids could be detrimental to the operation of the system and, when detected, should be removed.

SAFETY AND HANDLING

Material Safety Data Sheets may be obtained through www.therminol.com or from Environmental Operations, Solutia Inc. Heat transfer fluids are intended only for indirect heating purposes. Under no circumstances should this product contact or in any way contaminate food, animal feed, food products, food packaging materials, food chemicals, pharmaceuticals or any items which may directly or indirectly be ultimately ingested by humans. Any contact may contaminate these items to the extent that their destruction may be required. Precautions against ignitions and fires should be taken with this product.

NOTICE: Although the information and recommendations set forth herein (hereinafter "Information") are presented in good faith and believed to be correct as of the date hereof, Solutia Inc. makes no representations or warranties as to the completeness or accuracy thereof. Information is supplied upon the condition that the persons receiving same will make their own determination as to its suitability for their purposes prior to use. In no event will Solutia Inc. be responsible for damages of any nature whatsoever resulting from the use of or reliance upon Information or the product to which Information refers. Nothing contained herein is to be construed as a recommendation to use any product, process, equipment or formulation in conflict with any patent, and Solutia Inc. makes no representation or warranty, express or implied, that the use thereof will not infringe any patent. NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR OF ANY OTHER NATURE ARE MADE HEREUNDER WITH RESPECT TO INFORMATION OR THE PRODUCT TO WHICH INFORMATION REFERS.

WORLDWIDE SALES OFFICES

UNITED STATES

For order assistance

Please call our Customer Service Department, toll free at (800) 426-2463.

For technical assistance

Please call our Technical Service Hotline, toll free at (800) 433-6997.

St. Louis

P.O. Box 66760
St. Louis, Missouri 63166-6760
Tel: (314) 674-1000
Fax: (314) 674-6331

INTERNATIONAL SALES OFFICES

Argentina

Solutia Argentina S.R.L.
Alicia Moreau de Justo 1960
2do piso – Oficina 203
Puerto Madero Buenos Aires-
Argentina
Tel: +54-11-4515-0709
Fax: +54-11-4515-0728

Brazil

Solutia Brazil Ltda.
Rua Gomes de Carvalho
1306-60. Andar 04547-005
Sao Paulo, SP, Brazil
Tel: +55-11-3365-1839/1838/1832
Fax: +55-11-3365-1833

Canada

Solutia Canada Inc.
6800 St. Patrick Street
LaSalle, Quebec
Canada H8N 2H3
Tel: 514-366-4855
Fax: 514-366-8355

Europe/Africa/Middle East

Solutia Europe N.V./S.A.
Rue Laid Burniat, 3
Parc Scientifique – Fleming
B-1348 Louvain-la-Neuve (Sud)
Belgium
Tel: +32.10.48.12.11
Fax: +32.10.48.12.12

India

Solutia Chemicals India Pvt Ltd,
205-207, Midas Building, 2nd Floor
Sahar-Plaza Complex
Andheri-Kurla Road
Andheri East
Mumbai-59 India
Tel: +91-22-2830-2860
Fax: +91-22-2830-2859

Japan

Solutia Japan Ltd.
Shinkawa Sanko Building
Second Floor
1-3-17, Shinkawa, Chuo-ku
Tokyo 104-0033, Japan
Tel: +81-03-3523 2080
Fax: +81-03-3523 2070

Korea

Solutia Korea Ltd.
3rd Floor, Anglican Church Building
3-7, Jeong-dong, Joong-gu,
Seoul 100-120, Korea
Tel: +82-2-736-7112
Fax: +82-2-739-5049

Malaysia

Solutia Hong Kong Ltd.
Malaysia Branch
12th Floor (1309-B)
Kelana Parkview Tower
No. 1 Jalan SS 6/2
Kelana Jaya
47301 Petaling Jaya
Selangor, Malaysia
Tel: +60-3-7804-5766
Fax: +60-3-7804-4067

Mexico

Solutia Mexico, S. de R.L. de C.V.
Paseo de la Reforma No. 2654 Piso 3-A
Col. Lomas Altas
C.P. 11950
México D.F.
Tel: +52-55-5259-6800
Fax: +52-55-570-9847

Russia/CIS

Solutia Europe S.A.
Trekhpudny Lane, 9 Office 203
Moskow 123001 Russia
Tel: +7-095-9335911
+7-095-9335912
Fax: +7-502-9335910

Shanghai

Solutia International Trade Co. Ltd.
Unit 18-06/07
Harbour Ring Plaza
18 Xi Zang Zhong Road
Shanghai, PRC 200001
Tel: +86-21-6386-7500 ext. 15
Fax: +86-21-6385-1882

Singapore

Solutia Singapore Pte. Ltd.
101 Thomson Road
#19-01/02 United Square
Singapore 307591
Tel: +65-6357-6100
Fax: +65-6357-6201

Suzhou

Solutia Chemical Co. Ltd., Suzhou
9th Floor, Kings Tower
12 Shi Shan Road
Suzhou New District, PRC 215011
Tel: +86-512-6825-8167
Fax: +86-512-6825-0417

Taiwan

Solutia Taiwan Inc.
7F-1, 122 Chung-Cheng Road
Shih-lin Dist.
Taipei 111, Taiwan
Tel: +886-2-8866-6181
Fax: +886-2-8866-2703

Thailand

Solutia Thailand Ltd.
3rd Floor
Lake Rajada Office Complex Building
193/11 Ratchadapisek Road
Klongtoey, Bangkok 10100
Thailand
Tel: +662-264-0940-3
Fax: +662-264-0944

Visit our Web site at
www.therminol.com



Solutia
P.O. Box 66760
St. Louis, MO 63166-6760
Tel: (314) 674-1000

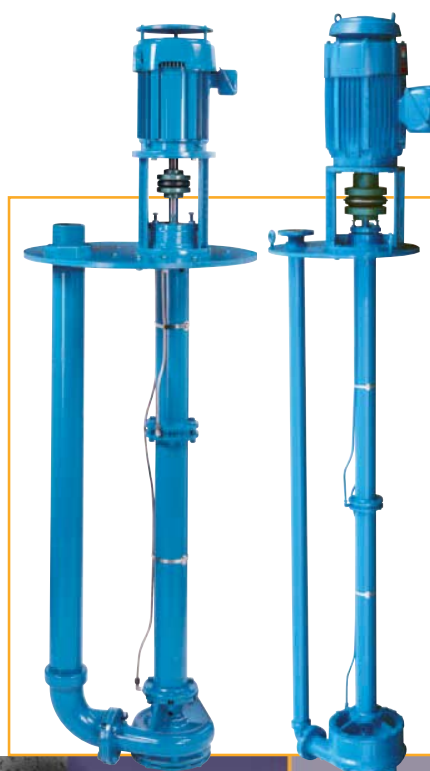
Litho in U.S.A. CTHE 80001
® Registered Trademark of Solutia Inc.
© Solutia Inc., 2004. All rights reserved.
♻️ Printed on recycled paper



Goulds Pumps

Goulds 3171 / CV3171

Vertical Sump and Process Pumps



Engineered for life



The "Veteran" vertical sump and process pump. Thousands of installations—industrial process, sump drainage, corrosive liquids, pollution control, molten salts—attest to the 3171's remarkable performance. Simple mounting.

Goulds Model 3171

Vertical Sump and Process Pumps Designed for the Total Range of Industry Services

- ◆ Capacities to 3180 GPM (722 m³/h)
- ◆ Heads to 344 feet (105 m)
- ◆ Temperatures to 450° F (232° C)
- ◆ Pit Depths to 20 feet (6 m)

Design Features

- ◆ Self-Priming
- ◆ Rugged Double Row Thrust Bearing
- ◆ Heavy Duty One-piece Shaft
- ◆ External Impeller Adjustment
- ◆ Available in a Wide Range of Alloys
- ◆ Open Impeller Design
- ◆ Vapor Proof Option: Choice of packing, or mechanical seal for containing sump vapors

Services

- ◆ Industrial Process
- ◆ Industrial Sump Wastes
- ◆ Molten Sulfur
- ◆ Tank Unloading
- ◆ Corrosive and Non-Corrosive Liquids

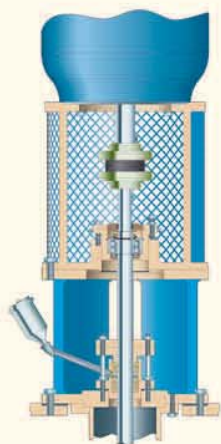


Model 3171 Vertical Sump and Process Pumps

Heavy Duty Design Features for a Wide Range of Services

LABYRINTH BEARING SEAL

Prevents premature bearing failure due to lubricant contamination.



OPTIONAL UPPER STUFFING BOX

HEAVY COLUMN PIPE

Provides rigid support for pump and bearings.

LINESHAFT STEADY BEARING

Self-lubricating carbon/graphite bearing furnished as standard—best for handling water, corrosives, solvents and high temperature liquids.

RESTRICTOR BUSHING

Close running bushing to prevent pressure loss from casing.



FULLY OPEN IMPELLER WITH BACK PUMP-OUT VANES

Acknowledged best design for process services—solids handling, stringy material, corrosives, abrasives.

C-FACE MOTOR MOUNTING

Accommodates readily available C-face motors. Also available for P-base and IEC motors.

CONTINUOUS HIGH PERFORMANCE

Original high efficiency maintained by simple external adjustment resulting in long-term energy savings.

DOUBLE ROW THRUST BEARING

Grease lubricated—carries pump thrust load; sealed for outdoor installation.

DISCHARGE LOCKED TO PUMP SUPPORT PLATE FOR STRENGTH

ANY MOUNTING REQUIREMENTS

Met by support plate and optional pit cover. Float switches, alternators and other control devices can be easily mounted.

STEADY BEARING HOUSING

Precision machined register fit of column, bearing housing and casing assures positive bearing and shaft alignment. Completely interchangeable with all lineshaft bearing options.

HEAVY DUTY ONE-PIECE SHAFT

With closely spaced steady bearings assures long life and low maintenance.

HEAVY DUTY CASING

Provides rigid support for shaft—closer to impeller load—resulting in longer steady bearing life.

REMOVABLE SUCTION COVER

Replaceable wear part for low operational costs.

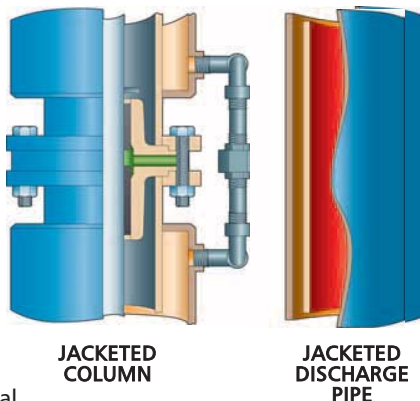
Optional Features for Application Flexibility

Goulds offers a variety of options to meet users' specific plant and application requirements. Your Goulds representative will be glad to recommend the features

best suited to your particular service conditions to assure safe, efficient and reliable operation.

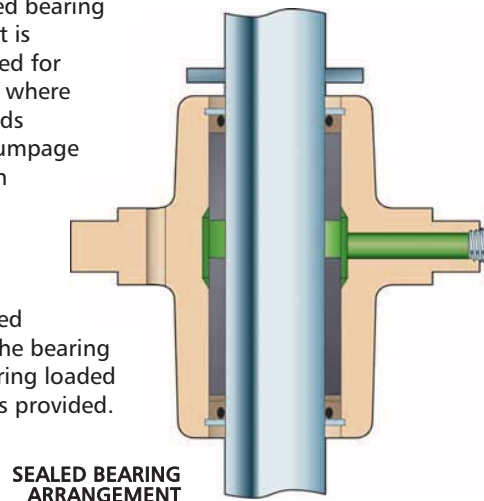
Molten Sulfur Pumps

- Jacketed column and discharge pipes (tested to 150 PSIG [1034 kPa])
- Available in all principal alloys
- One-piece, self-lubricating, graphite impregnated steady bearing
- Vapor-proof construction to seal sump vapors
- Balanced, low NPSH, semi-open impeller for optimum performance
- Multiple intermediate bearings permit overall settings to 20 feet (6 m)



Abrasive Liquids

Goulds sealed bearing arrangement is recommended for applications where abrasive solids are in the pumpage and no clean flush is available. A carbon bearing and lip seal is used for sealing the bearing housing. Spring loaded grease cup is provided.



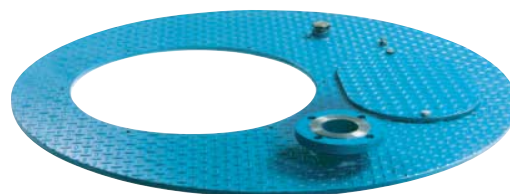
Optional Bearings

Goulds offers the best choice of steady bearings to meet service requirements...optional fluted rubber with rigid shell, bronze, and (standard) carbon.



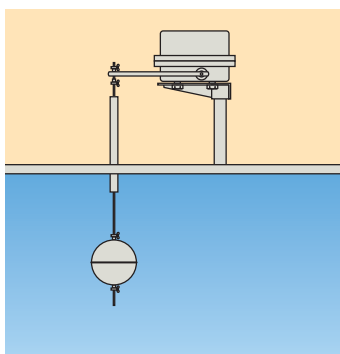
Mounting Systems

Goulds can provide optional mounting systems to meet specific user requirements including pit covers fabricated with float control mounting points, man holes for access, vapor-proof designs, and lube line holes.

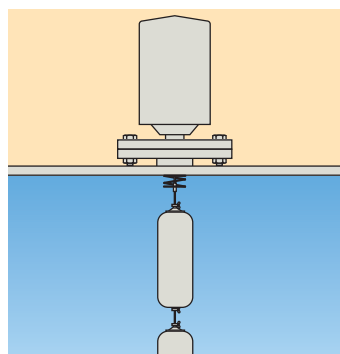


Float Controls

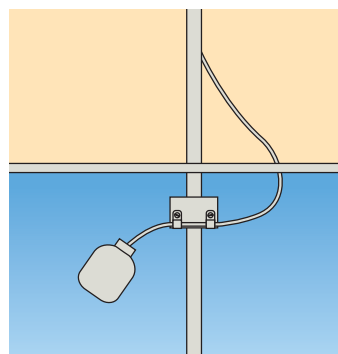
The widest range of float controls is offered to suit the individual requirements of every installation. Ask your Goulds representative for a complete list of options.



**BALL-OPERATED
FLOAT SWITCH**



**DISPLACER TYPE
LIQUID LEVEL SWITCH**

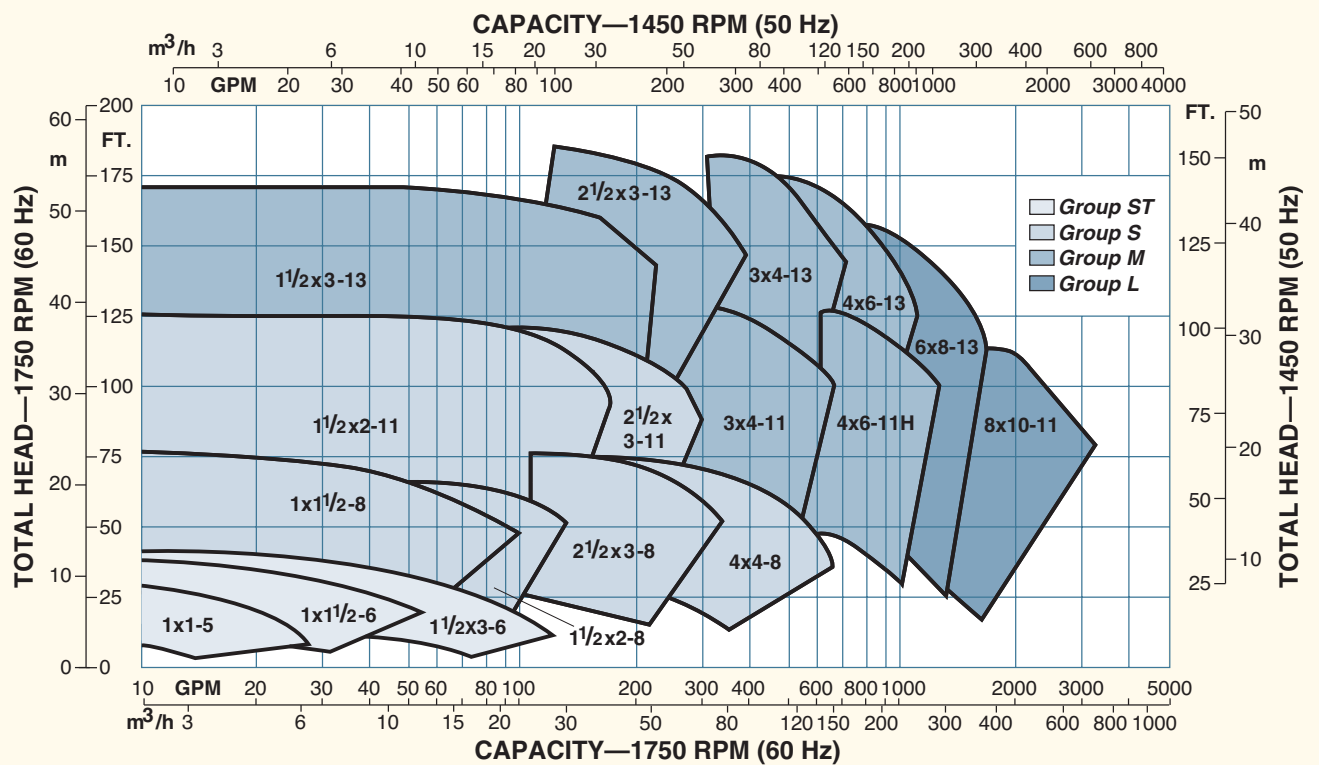
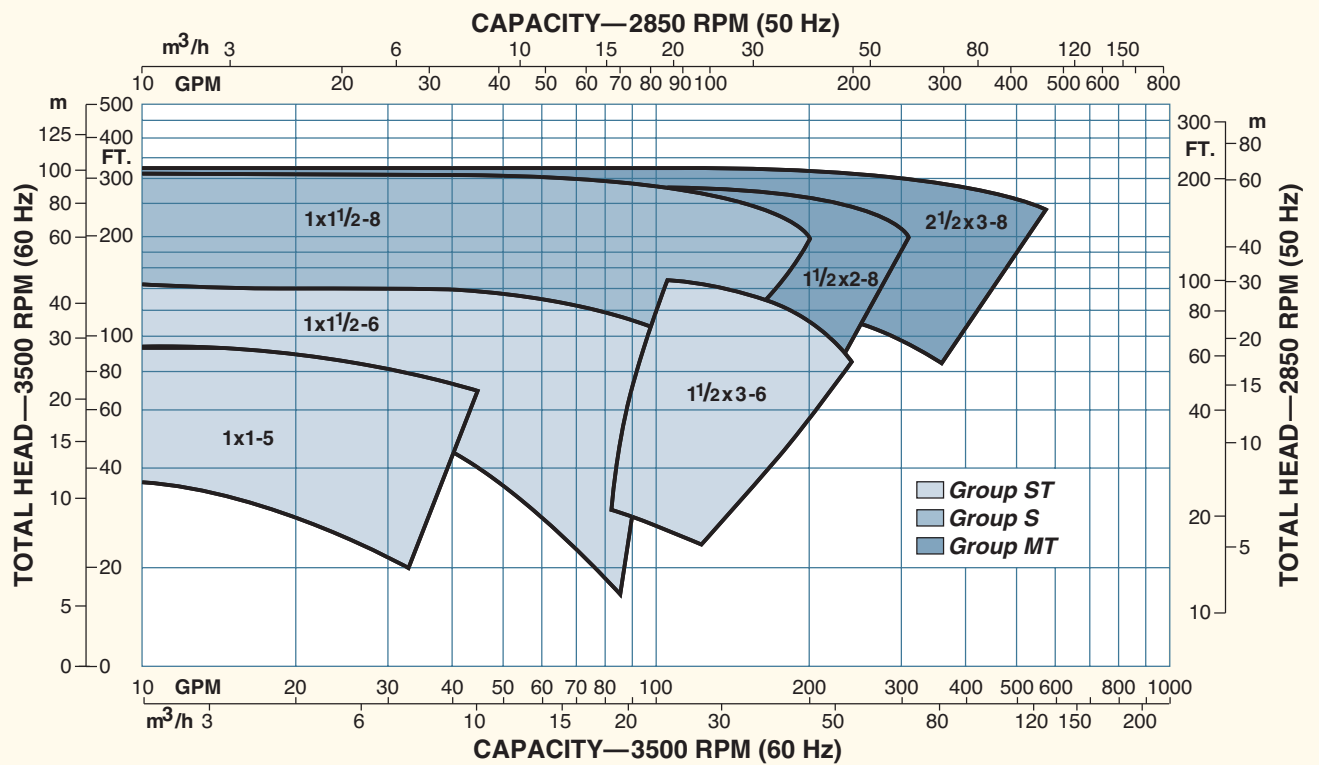


**PIPE-MOUNTED,
DIRECT ACTING FLOAT SWITCH**

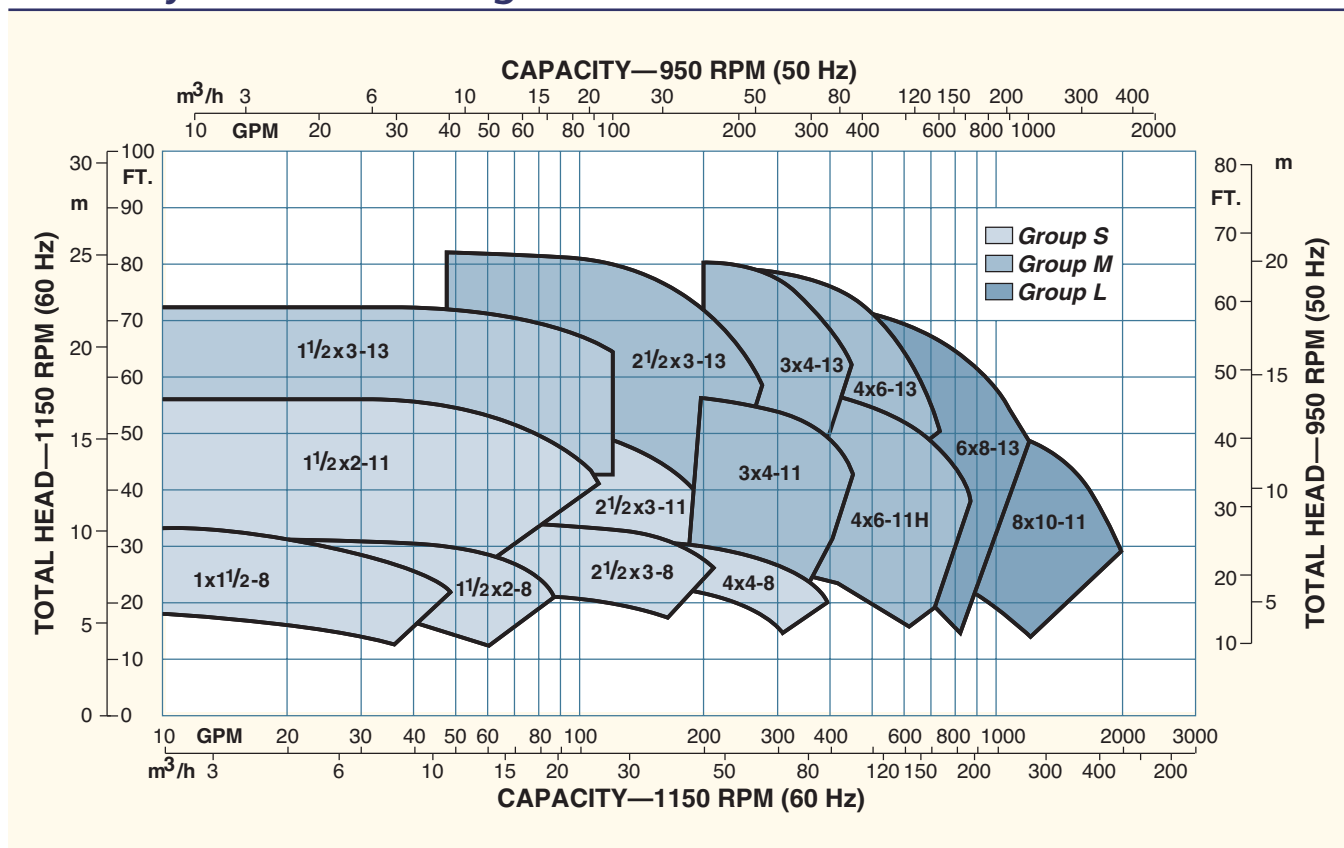
Other Options

- Complete line of controls and starters
- Enclosed lineshaft
- Other types of float controls
- ANSI tank mounting
- Flanged discharge connections

3171 Hydraulic Coverage



3171 Hydraulic Coverage

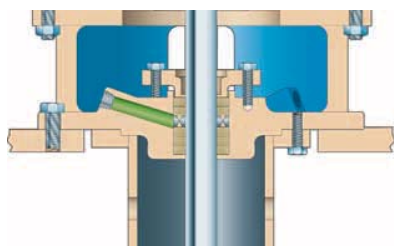


Maximum Sealing Flexibility

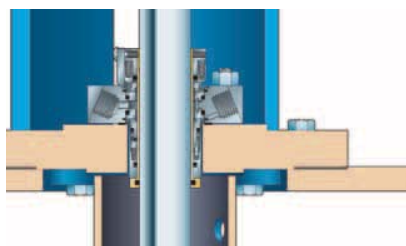
Vapor-Proof Construction

Optional upper stuffing box allows use of wide range of sealing arrangements to meet specific user requirements for sealing toxic, hazardous, noxious or corrosive fumes. With this option, the discharge pipe and all fittings are sealed at the support plate.

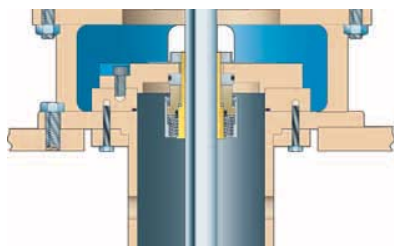
Your Goulds representative will gladly recommend the best sealing solution for your service, some of which are illustrated here.



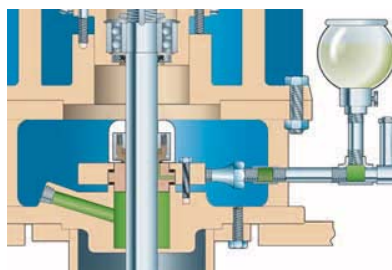
PACKED BOX
Standard vapor-proof sealing option. Includes packing, lantern ring and grease lubricator (not illustrated).



DOUBLE CARTRIDGE SEAL
Available in wet or dry versions to control emissions.



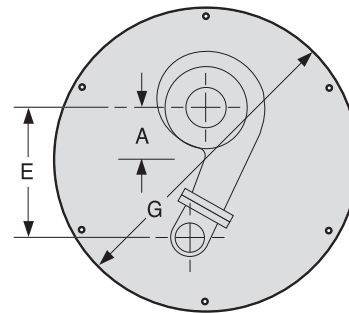
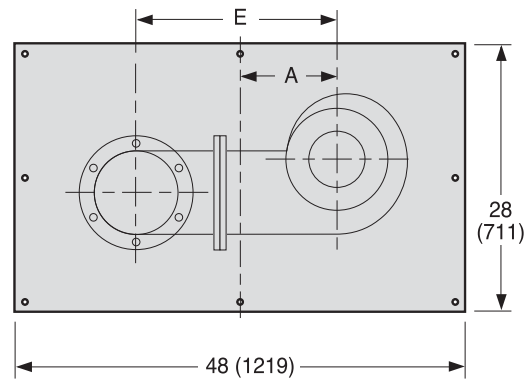
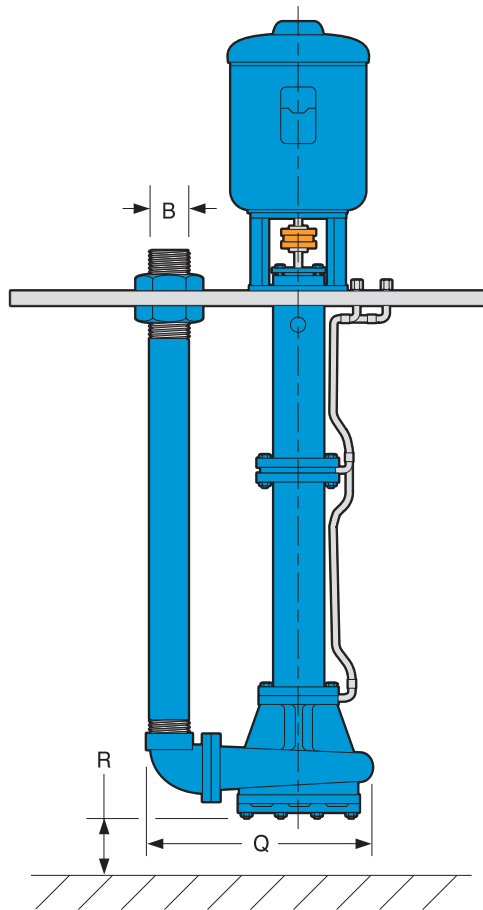
DRY RUNNING SEAL
Dry running, non-contacting cartridge gas seal. Pressurized air barrier between seal faces prevents vapor leakage.



SINGLE OUTSIDE SEAL
Mechanical seal with oil lubricator and sight glass. Outside mount has no metal parts in contact with vapors.

Dimensions Model 3171

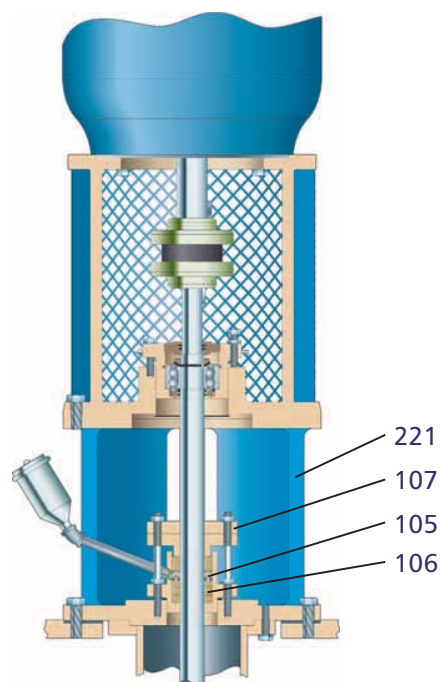
All dimensions in inches and (mm). Not to be used for construction.



DIMENSIONS																						
	ST			S						M						MT			L			
	1x1-5	1x1 ¹ / ₂ -6	1 ¹ / ₂ x3-6	1x1 ¹ / ₂ -8	1 ¹ / ₂ x2-8	2 ¹ / ₂ x3-8	4x4-8	1 ¹ / ₂ x2-11	2 ¹ / ₂ x3-11	3x4-11	4x6-11H	1 ¹ / ₂ x3-13	2 ¹ / ₂ x3-13	3x4-13	4x6-13	1 ¹ / ₂ x2-8	1 ¹ / ₂ x2-11	2 ¹ / ₂ x3-8	6x8-13	6x8-13	8x10-11	8x10-11
A	3.6 (92)	3.6 (92)	3.6 (92)	3.6 (92)	3.6 (92)	3.6 (92)	4 (102)	4 (102)	4 (102)	4.5 (114)	4.5 (114)	4.5 (114)	4.5 (114)	4.5 (114)	4.5 (114)	4 (102)	4 (102)	4.5 (114)	10.4 (264)	10.4 (264)	10.4 (264)	10.4 (264)
B	1.5 (38)	2 (51)	3 (76)	2 (51)	2 (51)	3 (76)	4 (102)	2 (51)	3 (76)	4 (102)	4 (102)	3 (76)	3 (76)	4 (102)	4 (102)	3 (76)	3 (76)	4 (102)	6 (152)	8 (203)	8 (203)	10 (254)
E	8.1 (205)	8.4 (213)	9.2 (232)	10.1 (256)	9.6 (244)	10.3 (262)	12.1 (306)	11.4 (289)	12.1 (306)	12.8 (325)	14.3 (362)	13.6 (346)	13.2 (335)	13.8 (351)	14.8 (375)	11.4 (289)	12.37 (314)	13.6 (346)	21.5 (546)	21.5 (546)	24.3 (616)	24.3 (616)
G	22 (559)	22 (559)	22 (559)	22 (559)	22 (559)	22 (559)	26.5 (673)	26.5 (673)	26.5 (673)	31 (787)	31 (787)	31 (787)	31 (787)	31 (787)	31 (787)	26.5 (673)	31 (787)	31 (787)	—	—	—	—
R	6 (152)	5.8 (148)	5.3 (132)	4.3 (108)	4.4 (111)	3.8 (97)	3.3 (84)	4.6 (116)	4.2 (106)	4 (102)	3.7 (94)	4.8 (121)	4.7 (119)	4.3 (109)	3.7 (94)	4.4 (111)	4.56 (116)	3.8 (97)	6.9 (174)	6.9 (174)	5.3 (133)	5.3 (133)
Q*	14.3 (362)	15.3 (387)	16.8 (425)	17 (432)	17 (432)	18.5 (467)	22.5 (572)	20.5 (521)	22.5 (572)	24 (610)	26.5 (673)	25 (635)	25 (635)	25.5 (648)	27.5 (699)	20 (508)	22 (559)	22.8 (578)	38.5 (978)	39.5 (1003)	42.5 (1080)	43.5 (1105)

*Add 3 in. (76) for float mounted option.

Sectional View Model 3171

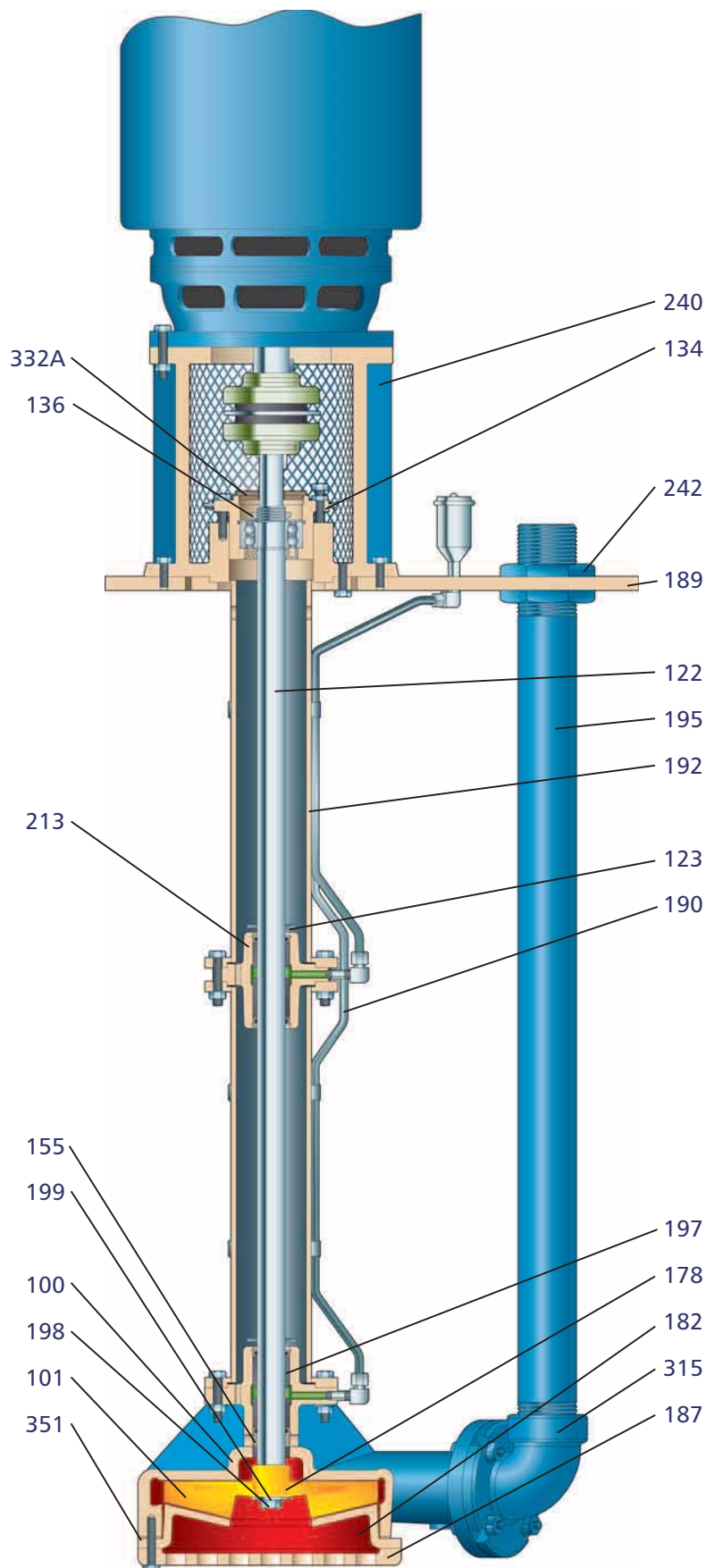


Optional Upper Stuffing Box



Designed to Meet (or Exceed) Today's Tough Environmental Requirements

Installed in 1988 on hydrocarbon waste sump service, this 3171 was easily retrofitted with vapor-proof construction including a ferrofluidic seal (see page 7) to meet tougher EPA emission requirements. Readings were less than 30 ppm—*exceeding* EPA requirements



3171 Parts List and Materials of Construction

Item Number	Part Name	Material					
		Cast Iron	Bronze Fitted	Carbon Steel	316SS	Alloy 20	Hastelloy B & C
100	Casing	Cast Iron		Steel	316SS	Alloy 20	Hastelloy
101	Impeller	Ductile Iron	Bronze	Steel	316SS	Alloy 20	Hastelloy
105	Upper Stuffing Box Lantern Ring	Teflon					
106	Upper Stuffing Box Packing	Acrylic Graphite					
107	Upper Stuffing Box Gland	316SS					
112	Ball Bearing	Double Row Angular Contact					
122	Pump Shaft	Steel			316SS	Alloy 20	Hastelloy
123	Deflector	EPDM					
134	Bearing Shell	Cast Iron					
136	Bearing Locknut	Steel					
178	Impeller Key	316SS				Alloy 20	Hastelloy
155	Restrictor Bushing	Carbon-Filled Teflon®					
182	Suction Cover	Cast Iron		Steel	316SS	Alloy 20	Hastelloy
187	Strainer	Cast Iron		316SS		Alloy 20	Hastelloy
189	Pump Support Plate	Steel					
190	Lubrication or Flush Pipe	Steel		316SS		Alloy 20	Hastelloy
192	Head Column	Steel			316SS	Alloy 20	Hastelloy
195	Discharge Pipe	Steel			316SS	Alloy 20	Hastelloy
197	Steady Bearings	Carbon					
198	Impeller Screw	316SS				Alloy 20	Hastelloy
199	Impeller Washer	316SS				Alloy 20	Hastelloy
213	Steady Bearing Housing	Cast Iron			316SS	Alloy 20	Hastelloy
221	Upper Stuffing Box (When Used)	Cast Iron					
240	Motor Support	Cast Iron					
242	Pipe Collar (Discharge Pipe)	Steel			316SS	Alloy 20	Hastelloy
306	Column Extension	Steel			316SS	Alloy 20	Hastelloy
315	Discharge Elbow	Cast Iron		Steel	316SS	Alloy 20	Hastelloy
332A	Labyrinth Seal	Carbon-Filled Teflon® with Viton O-ring					
351	Gasket—Suction Cover to Casing	Nitrile Acrylic					
369	Retaining Ring—Steady Bearing	Stainless				Alloy 20	Hastelloy

Construction Details All dimensions in inches and (mm).

		ST			S						M						MT			L	
		1x1-5	1x1 1/2-6	1 1/2x3-6	1x1 1/2-8	1 1/2x2-8	2 1/2x3-8	4x4-8	1 1/2x2-11	2 1/2x3-11	3x4-11	4x6-11H	1 1/2x3-13	2 1/2x3-13	3x4-13	4x6-13	1 1/2x2-8	1 1/2x2-11	2 1/2x3-8	6x8-13	8x10-11
Pump	Weight (2 Foot Depth) Less Motor Lb (kg)*	275 (125)	280 (127)	295 (134)	305 (139)	315 (143)	325 (148)	390 (177)	385 (175)	425 (193)	540 (245)	590 (268)	535 (243)	550 (250)	570 (259)	600 (273)	325 (148)	385 (175)	335 (152)	830 (377)	910 (414)
	Weight—Add to Each 6" of Length Lb (kg)*	13 (6)	14 (6)	15 (7)	14 (6)	14 (6)	15 (7)	17 (8)	14 (6)	15 (7)	20 (9)	20 (9)	19 (9)	19 (9)	20 (9)	20 (9)	14 (6)	15 (7)	15 (7)	35 (16)	40 (18)
	Maximum Diameter of Solids	0.188 (5)	0.250 (6)	0.500 (13)	0.281 (7)	0.281 (7)	0.938 (24)	0.938 (24)	0.344 (9)	0.594 (15)	0.594 (15)	1.125 (29)	0.250 (6)	0.594 (15)	0.594 (15)	0.594 (15)	0.281 (7)	0.344 (9)	0.938 (24)	0.594 (15)	1.188 (30)
Shaft	Diameter at Impeller	0.6875 (17)			Tapered 1.1118 (28) Large End						Tapered 1.585 (40) Large End						Tapered 2.222 (56) Large End				
	Diameter at Coupling End	0.875 (22)						1.375 (35)						1.875 (48)							
	Diameter at Steady Bearing	1.125 (29)						1.625 (41)						2.25 (57)							
Bearings	Ball Bearing	5305 or Equal						5308 or Equal						5311 or Equal							
	Steady Bearing (Sleeve Type)	1.125 I.D. x 1.625 O.D. (29x41)						1.625 I.D. x 2.125 O.D. (41x54)						2.25 I.D. x 3.0 O.D. (57x75)							
General	Maximum Total Working Pressure—Casing	150 PSI (1034 kPa)																			
	Max. Liquid Temp.—Without Upper Stuffing Box	210° F (99° C)																			
	Max. Liquid Temperature—Upper Stuffing Box	450° F (232° C)																			

*L Group Pump Weights are based on a 3 ft (.9m) Setting



PRO Services® Extending Equipment Life...

Product Repair (all types and brands of rotating equipment)

- Service Center Repair
- Field Service
- Parts Supply

Reliability Improvement

- Inventory Management
- Replacement/Exchange
- Turnkey Repair/Installation
- Training

Optimization of Assets

- Predictive Analysis/Condition Monitoring
 - Root Cause Failure Analysis
 - Pump & System Assessments
 - Upgrades – Mechanical & Hydraulic
 - Maintenance Management/Contract Maintenance
-
- | | |
|-------------------------------------|---|
| • Technical Expertise | • Fast Turnaround |
| • Factory Trained Service Personnel | • Emergency Service – 24 hours/day, 7 days/week |
| • Quality | • ISO and Safety Certified |

PROSMART

ProSmart® provides continuous machinery monitoring to identify little problems before they become big problems...like downtime. Using wireless technology, advanced signal processing capabilities, and easy-to-deploy sensors, ProSmart offers an affordable means to monitor all of your rotating equipment anywhere in the world. By identifying and alerting you to changes in operating conditions, ProSmart increases your time to respond to either correcting the upset condition, or properly plan its repair.



Key Features include:

- Continuous data acquisition and analysis – ProSmart collects vibration, temperature, and available process conditions every five seconds; saving you time from routine data collection.
- Automatic Notification and Accessibility – By alerting when a machine goes into distress, you are able to focus your resources on recovery activities. The ProNet web-hosted solution allows access to information anywhere in the world through a standard Internet browser connection.
- Advanced diagnostic tools – More than simple overall data, ProSmart provides advanced analysis capabilities such as time-waveform, spectral, and spectral windowing.
- Easy to deploy – Using plug and play sensors, wireless connectivity, and an industrially hardened enclosure, ProSmart can be easily deployed throughout your plant, including hazardous areas.

PUMPSMART

PumpSmart® is the latest advancement in pump control and protection to reduce energy consumption, increase uptime and decrease maintenance cost. It allows the pump to be right-sized to the application by dialing in the speed and torque which increases flow economy, reduces heat and vibration, and improves overall system reliability.

- **Simplified Pump Control** — PumpSmart was designed specifically to optimize pumping applications and can be used to control a single pump or coordinate between multiple pumps without the need for an external controller.
- **Pump Protection** — PumpSmart guarantees to protect the pump from upset conditions with patented sensorless pump protection algorithms.
- **Smart Flow** — PumpSmart features a sensorless flow function for centrifugal pumps that can calculate the flow of the pump within $\pm 5\%$ of the pump rated flow.
- **Drive for the DCS** — While most VFDs can only provide basic information, PumpSmart offers unparalleled insight to the pump operation which allows for smoother process control and efficiency.
- **Pump Experts** — PumpSmart is a variable speed drive with pump-specific algorithms imbedded into the drive. With over 150 years of pump knowledge, let the pump experts take responsibility of your pump system.



Visit our Web site at www.gouldspumps.com

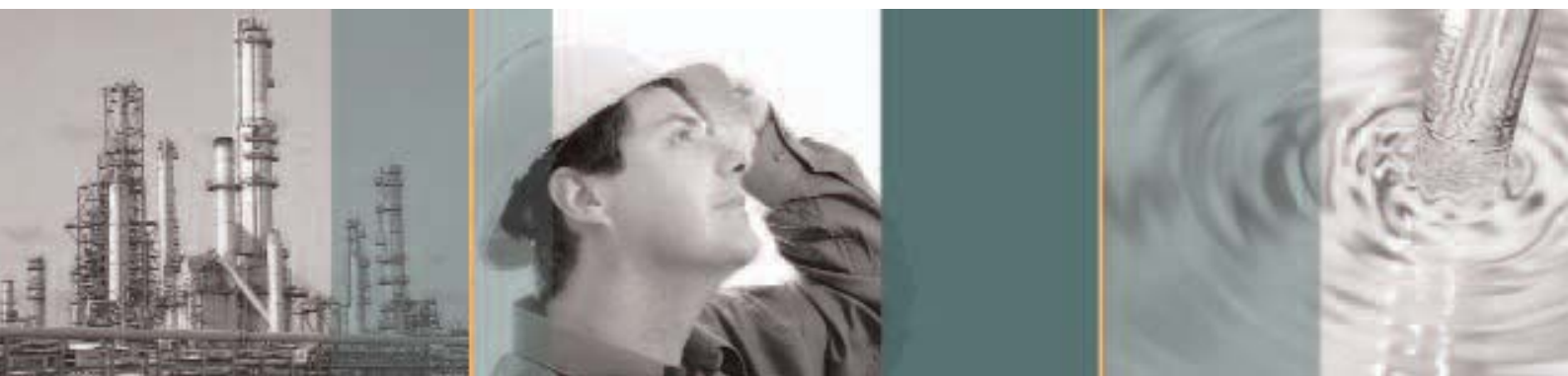
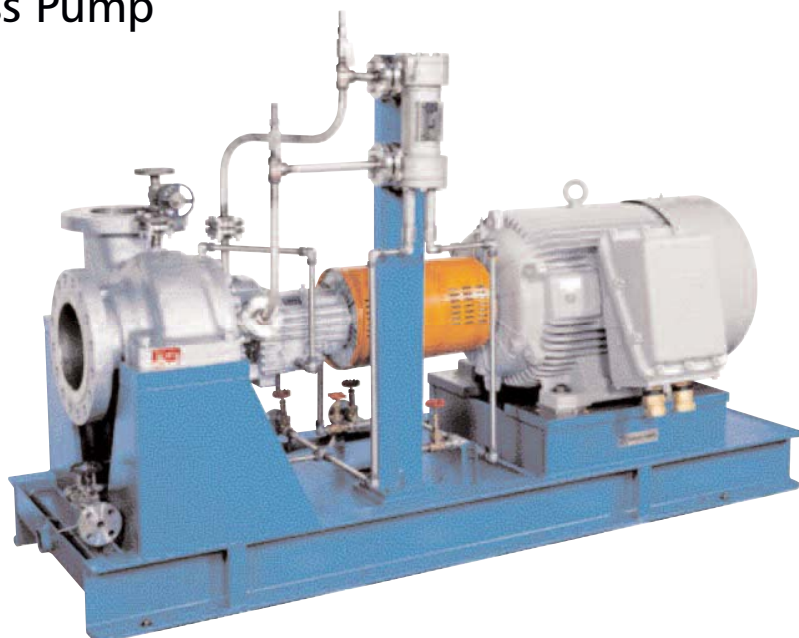




Goulds Pumps

Goulds 3700

ISO 13709 2nd Edition/API 610 11th Edition
Single-Stage, Overhung (API OH-2)
Process Pump



Engineered for life

A Leader in API Engineered Pump Package Solutions...

Proven API Leadership

ITT Goulds Pumps is a proven leader in API Pumps

- ◆ Over 20,000 units installed
 - Over 17,000 OH2/OH3's
 - Over 3,000 BB1/BB2/BB3 pumps
- ◆ 40+ years of API expertise
- ◆ Participating member on API 610 and API 682 committees

Family of API Pumps

ITT Goulds Pumps has a family of proven API pumps

- ◆ Overhung pumps
- ◆ Single and two-stage between-bearing
- ◆ Multistage between-bearing pumps— axially split
- ◆ Barrel Multi-Stage pumps
- ◆ Vertical, double casing pumps
- ◆ Specialty pumps

Global Coverage

ITT Goulds Pumps has the global coverage needed to serve multi-national companies in any region.

Industry Leading Hydraulic Coverage

- ◆ We offer extensive coverage to meet your process needs.
- ◆ Better hydraulic fits can mean improved efficiency and long-term reliability and parts life.



6000 HP / 4600 kW Testing Capability

- ◆ Our expanded test facility can test your pump in the most demanding of conditions.
- ◆ Testing at rated speeds is critical to assess the impact of dynamic conditions including vibration.

API Engineering Expertise

- ◆ We are experts in packaging engineered pumps that meet your demanding applications — with true conformance to the latest API specifications.
- ◆ We have extensive experience in nearly every type of driver, bearing, seal, piping configuration, nozzle configuration, flange and baseplate designs to meet your application needs.
- ◆ ITT is a world leader in technology and engineering including hydraulics, materials science, mechanical design, and fluid dynamics.

Broad Applications

- ◆ Petroleum refining, production, and distribution
- ◆ Petrochemical and demanding chemical processing
- ◆ High temperature applications including boiler circulation
- ◆ General industrial requiring high temperature or high pressures



Model 3700

End Suction API-610/ISO 13709 Process Pump

- ◆ Designed for optimum reliability
- ◆ State-of-the-art mechanical design features
- ◆ 48 casing sizes—choice of impellers with most casings.



Model 3700 on high temperature
service at a U.S. Gulf Coast refinery.



High-pressure (1100 psi) customized pump.

Goulds 3700

High Temperature and Pressure Process Pumps that Meet or Exceed ISO 13709 and API 610 11th Edition

Safety, reliability, and versatility are the key words for our end-suction, centerline mounted, overhung (OH-2) API 610 process pump.

Safety and Reliability

We provide engineered solutions with true conformance to the latest API specifications including the stringent emissions containment per API 682.

The result is a safe and rugged overhung API process pump designed for a 20-year life.

Versatility

- ◆ Capacity to 8500 GPM (1930 m³/h)
- ◆ Total Dynamic Head to 1200 feet (360 m)
- ◆ Temperature to 800 °F (425 °C)
- ◆ Pressure to 870 PSIG (60 Bar)

Materials: Available in a wide range of materials including all API 610 constructions and custom application needs.

Engineered Hydraulics: An industry leading 99 hydraulic combinations to better match your process for efficiency and reliability. Custom hydraulics are available.

Engineered Packaging with a wide range of drivers, seals, piping, nozzle configurations, flanges, baseplates, and QC testing.

Services

Column Reflux	Hot Oil	Stabilizer Overhead
Column Bottoms	Reboiler	Stripper Overhead
Column Charge	Reactor Feed	Heat Transfer
Injection	Tower Bottoms	Slop Gas Oil
Fuel Blending	Heavy Gas Oil	Scrubber Circulation
Offsite Hydrocarbon Transfer		

Standard Features for Optimum Reliability



Proven API-610 Nozzle Load Design

Rugged casing and baseplate/pedestal support system provides flange loading capability exceeding API-610/ISO 13709 requirements without the use of a bearing frame support.

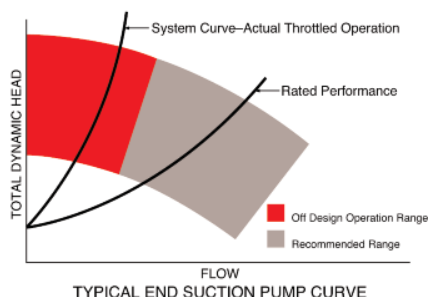
Full Flange Rating Pressure Capability

All pumps designed to operate at 2 pole running speeds have casings designed for the full pressure capability of a 300 RF flange.

Spiral Wound Casing Gasket

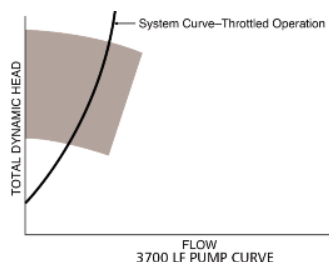
Casing to cover joint sealed with a spiral wound, controlled compression gasket required by API-610. Provides positive sealing up to the maximum design pressure and temperature.

Goulds 3700 LF Designed for Low Flow Services



Not All Pumps are Designed for Low Flows

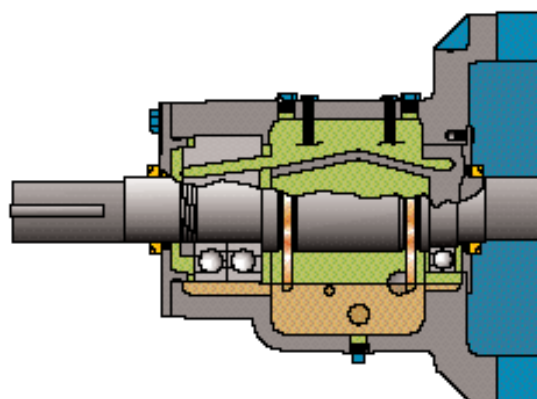
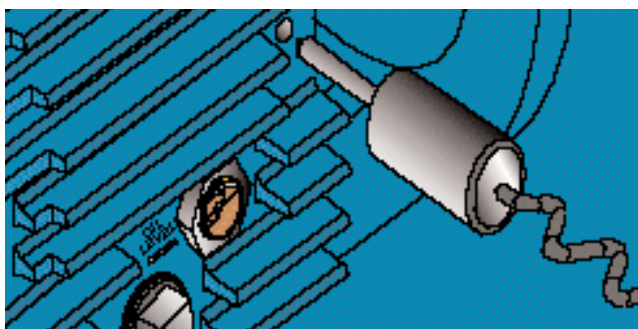
Many users throttle pumps to attain low flow rates - yet create bearing and seal issues. The traditional enclosed impeller passage ways would be too small to properly manufacture at these low flow rates.



3700 LF Low Flow Solution

The 3700 LF open radial vane impeller eliminates these enclosed impeller limitations. The unique circular volute casing eliminates competitor diffusers thus reducing the pump size, footprint and lifetime costs.

Improved Bearing Environment



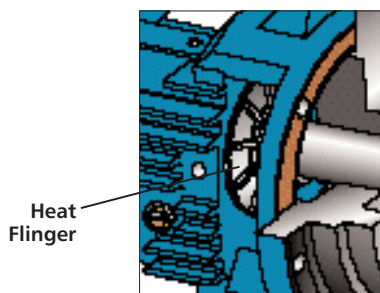
- Bearing frame fins provide optimum heat dissipation.
- Condition monitoring sites allow easy and consistent monitoring of temperature and vibration. Provision for instrumentation mounting per API-670 available.
- Large oil sight glass allows viewing condition and level of oil, critical for bearing life.

- Extra large oil sump provides cooler running bearings.
- Proven channeled oil lubrication system assures flow-thru of cooled oil to thrust and radial bearings.
- Standard dual oil rings, positively located, provide oil flow to channeled oil lubrication system and prevent oil foaming.

Optional Features for Application Flexibility

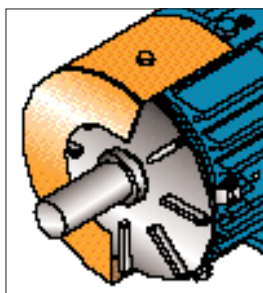
Goulds offers users a range of options to meet specific plant and process requirements.

High Temperature Capability *For high temperature applications, these options are available.*



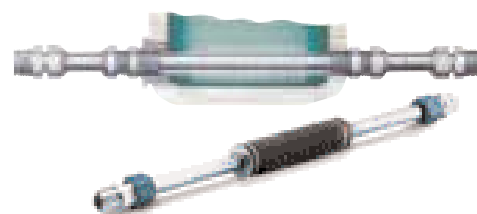
Heat Flinger

Heat flinger dissipates shaft-conducted heat and circulates air to reduce heat build-up.



Air Cooling

High capacity fan and shroud mounted on power end effectively reduce bearing frame temperature for cooler running bearings without using cooling water.



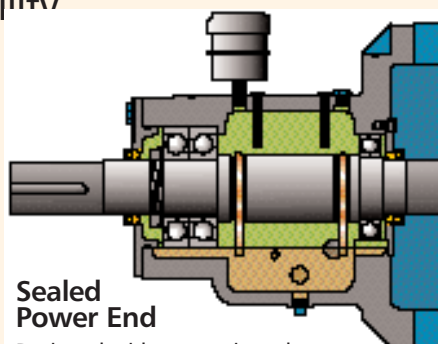
Water Cooling

Finned cooler for maintaining oil/bearing temperature. Corrosion resistant material.

Lubrication Flexibility

Oil Mist Lubrication System

Connections for pure or purge oil mist lubrication can be provided for immediate use or future requirements.

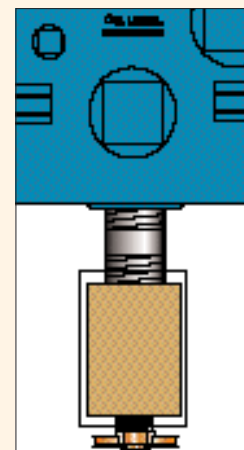


Sealed Power End

Designed with magnetic end face seals and expansion chamber to prevent contaminants from entering the power end.

Lubricant Sight Glass and Sampling Bottle

For visual inspection and sampling of oil.



Other Options

Extra Wide Baseplate

Provided for seal systems with auxiliary components to improve maintenance access.

Heavy Duty Pedestal

Unique trapezoidal design provides superior resistance to deflections from flange loads.

Top Suction Nozzle

This option reduces space requirements and installation costs for unique applications.

Inducer Option

Under certain conditions, reduction in NPHSR can be provided with an axial flow inducer.

Coke Crusher Option

Allows coke particles to be easily pumped by crushing coke with a cutter screw.



Inducer Option



Model 3700 ISO 13709/API-610

Process Pumps

Design Features for Wide
Range of High Temperature/
High Pressure Services

TANGENTIAL DISCHARGE

Design maximizes hydraulic efficiency.

CONFINED CONTROLLED COMPRESSION GASKET

Spiral wound gasket assures positive sealing
with no chance of misalignment.

RENEWABLE WEAR RINGS STANDARD ALL SIZES

Positively locked and set screwed.
Front and rear rings control seal chamber
flows and pressures. Optional non-metallic
rings for improved efficiency.

IMPELLER

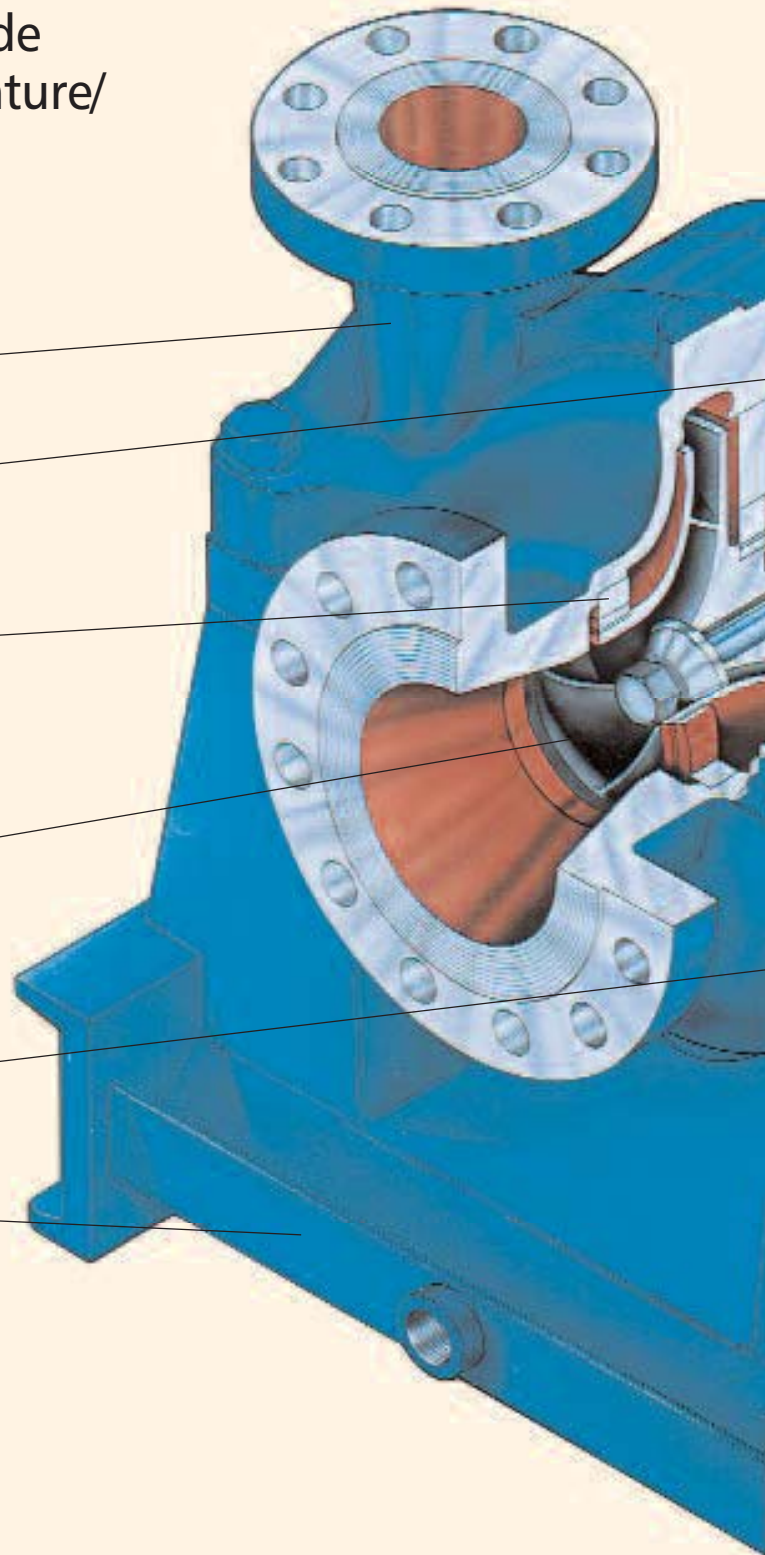
Multiple closed impellers for most casings
to meet specific hydraulic requirements.
Balanced to stringent requirements of
API-610/ISO 13709. **Low flow pumps utilize
an open impeller design.**

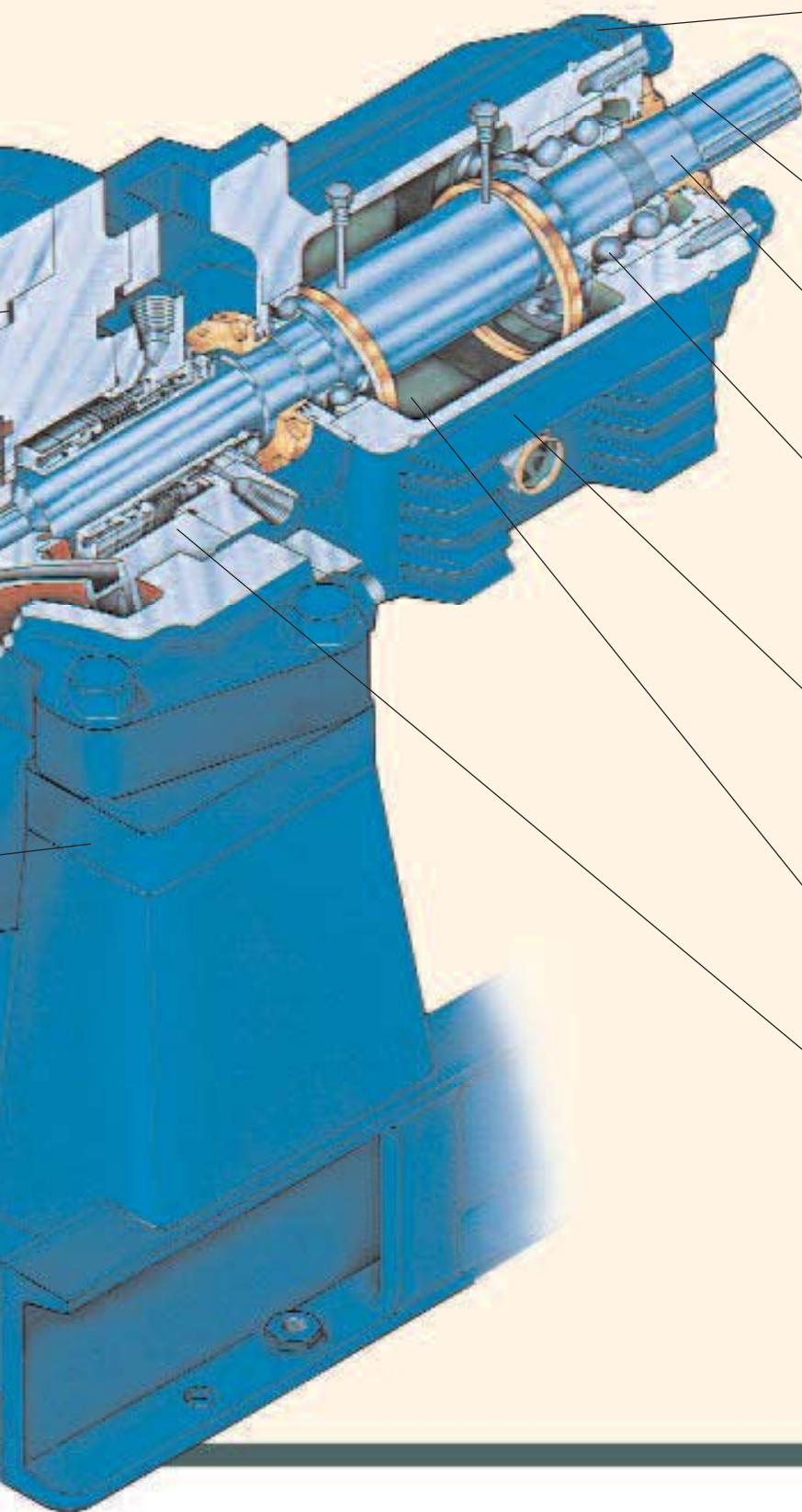
NOZZLE LOAD CAPABILITY

Casing/baseplate design optimized to exceed
toughest API/ISO nozzle load criteria.

FABRICATED BASEPLATE

Enlarged drain connection to prevent buildup
of debris. All joints are continuously welded.
Extra width sizes available to ease
maintenance of seal systems.





BONUS INTERCHANGEABILITY

Bearing frame, seal chamber, bearings, shaft, mechanical seal, impeller and wear rings completely interchangeable with Goulds Model 3910 bearing frame in-line process pumps. Entire back pull-out assembly interchangeable with Model 3710.

RIGID, HEAVY DUTY SHAFT

Minimizes shaft deflection, maximizes bearing and mechanical seal life.

LABYRINTH OIL SEALS

Labyrinth seal design prevents oil from leaking out and contaminants from intruding. Made from non-sparking metal.

BEARINGS

Duplex 40° angular contact thrust bearings and deep-groove (Conrad) radial bearings sized for minimum three (3) year bearing life under most severe operating conditions. Exceeds API-610/ISO 13709 requirements.

HEAVY DUTY BEARING FRAME

Piloted and metal-to-metal fits assure runouts and concentricities well within limits specified in API-610/ISO 13709. Large oil sump capacity. Cast fins enhance cooling.

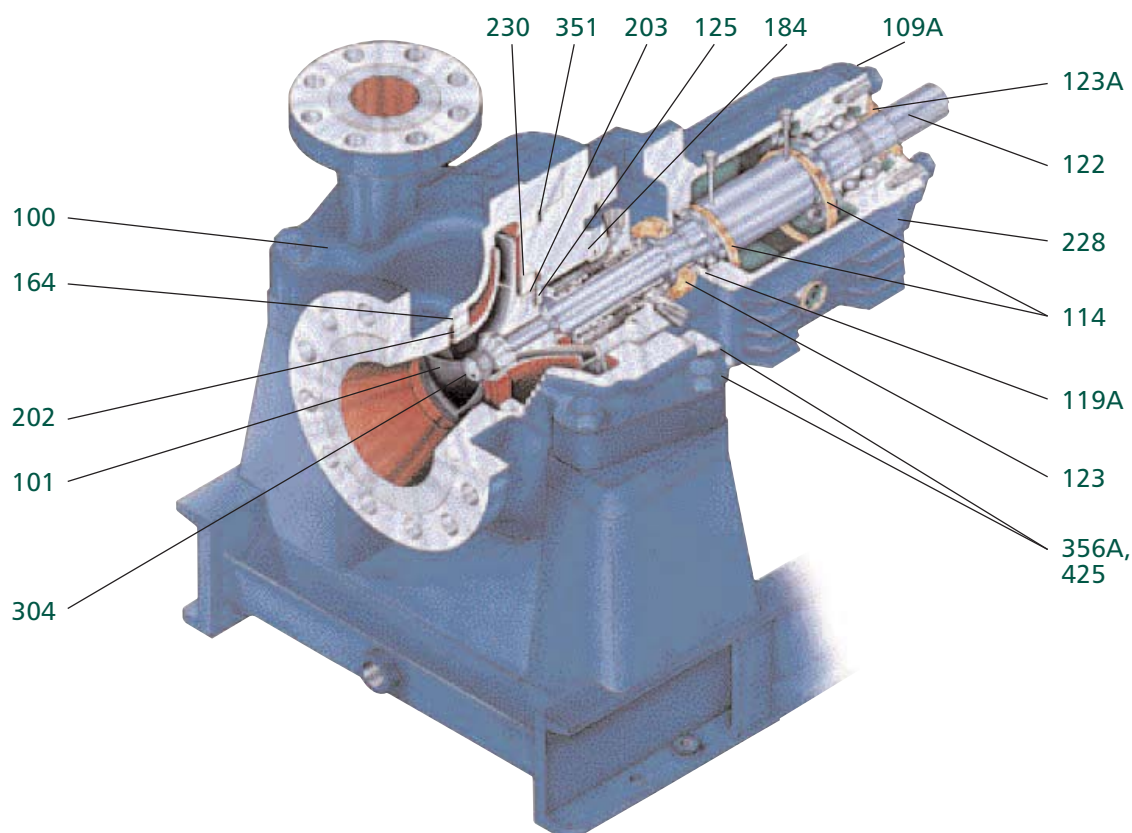
LUBRICATION SYSTEM

Proven, engineered ring-oiled flow-thru bearing lubrication optimizes MTBPM.

API 682 SEAL CHAMBER

Enlarged seal chamber fully conforms to API-610/ISO 13709 standards. Accepts wide range of API 682/ISO 21049 cartridge mechanical seals. Renewable throat bushing standard for controlled seal chamber environment.

Sectional View

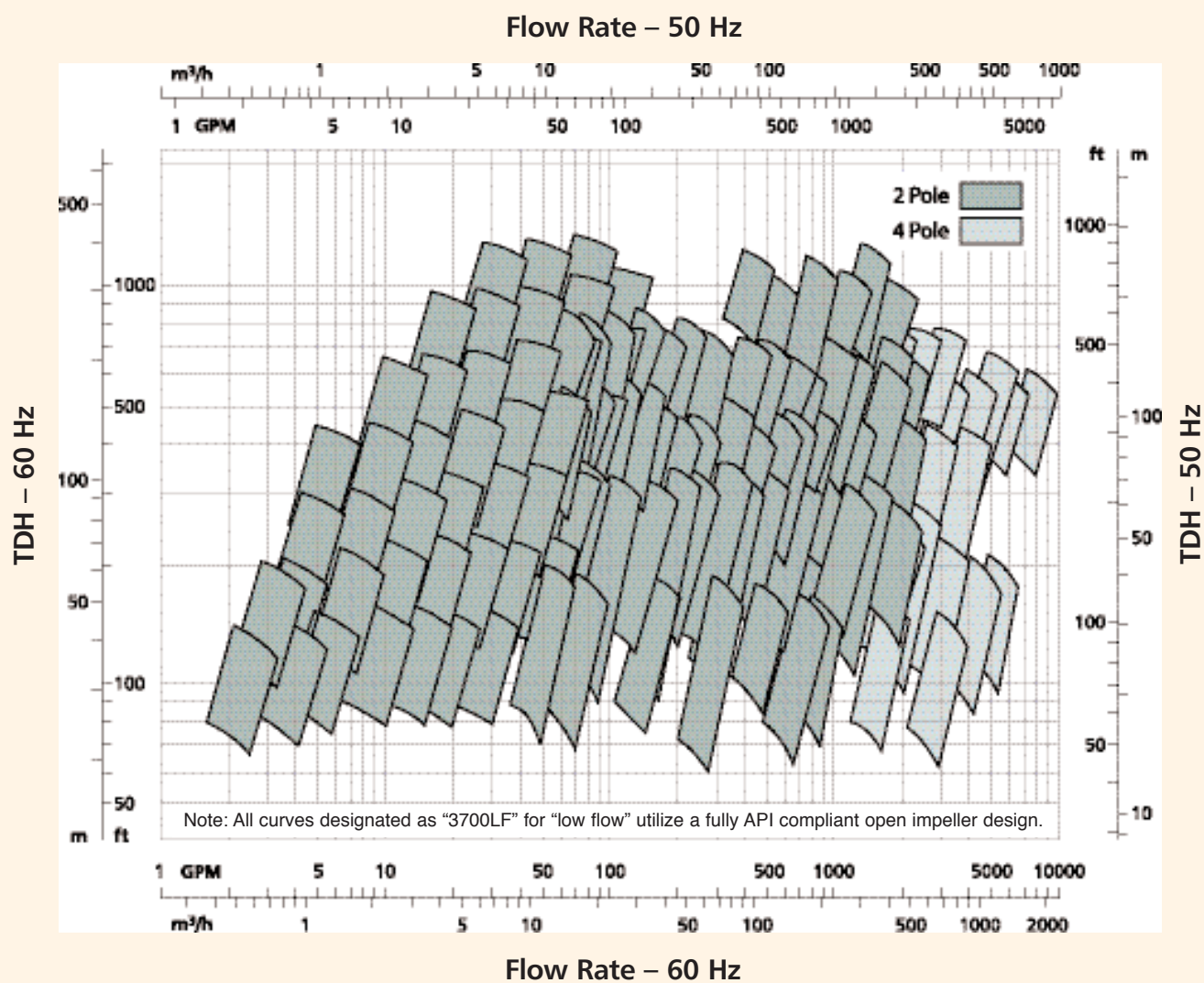


Parts List and Materials of Construction

Item Number	Part Name	API-610 Material Classes				
		S-4	S-6	S-8	C-6	A-8
100	Casing	Carbon Steel			12% Chrome	316L SS
101	Impeller	Carbon Steel	12% Chrome	316L SS	12% Chrome	316L SS
109A	Bearing End Cover - Outboard	Carbon Steel				
114	Oil Ring	Bronze				
119A	Bearing End Cover - Inboard	Carbon Steel				
122	Shaft	AISI 4140 *		316L SS	410 SS	316L SS
123	Labyrinth Seal - Inboard	Bronze/Viton				
123A	Labyrinth Seal - Outboard	Bronze/Viton				
125	Throat Bushing	Cast Iron	410 SS	316L SS	410 SS	316L SS
164	Wear Ring - Casing	Cast Iron	12% Chrome	316L SS	12% Chrome	316L SS
184	Seal Chamber Cover	Carbon Steel			12% Chrome	316L SS
202, 203	Wear Rings - Impeller	Cast Iron	12% Chrome	Nitronic 60	12% Chrome	Nitronic 60
228	Bearing Frame	Carbon Steel				
230	Wear Ring - Seal Chamber Cover	Cast Iron	12% Chrome	316L SS	12% Chrome	316L SS
304	Impeller Nut	Steel	316 SS			
351	Casing Gasket	Spiral Wound 316 SS				
353, 355	Gland Studs and Nuts	AISI 4140				
356A, 425	Casing Studs and Nuts	AISI 4140				

* 410 SS on S-6 when temperature exceeds 350° F (175°C). All other API materials of construction are available.

Hydraulic Coverage



Typical 3700 Installation

A Leader in API Engineered Pump Package Solutions

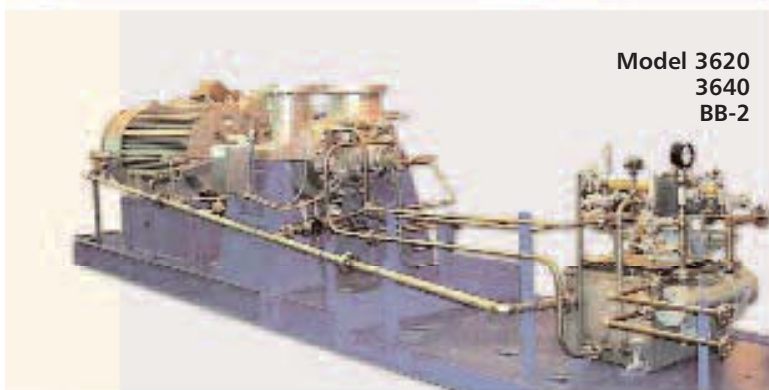
API Family of Pumps



Model 3700
OH-2



Model 3910
OH-3



Model 3620
3640
BB-2



Model
3610
BB-1

API Type	Goulds Model	Capacity GPM (M ³ /Hour)	TDH Feet (Meters)	Temperature °F (°C)	Pressure PSIG (kg/cm ²)
OH-2	3700	8500 (1930)	1200 (360)	800 (425)	870 (60)
OH-3	3910	6000 (1360)	750 (230)	650 (340)	600 (42)
BB-1	3610	50000 (11355)	700 (215)	300 (150)	300 (21)
BB-2	3640	7500 (1700)	2500 (760)	850 (455)	1130 (75)
BB-2	3620	20000 (4540)	1500 (455)	850 (455)	1000 (70)
BB-3	3600	8500 (1930)	9000 (2740)	400 (205)	4000 (275)
BB-5	7200CB	4000 (910)	9000 (2740)	800 (400)	4000 (275)
VS4	API 3171	3180 (720)	525 (160)	450 (232)	750 (50)
VS1	VIT	70000 (14760)	3500 (1060)	500 (260)	2500 (175)
VS6	VIC	70000 (14760)	3500 (1060)	500 (260)	2500 (175)



Model 3600
BB-3

Visit our Web site at www.gouldspumps.com



Fichas Internacionales de Seguridad Química

BUTANO (gas licuado)

ICSC: 0232



n-Butano (gas licuado)



Masa molecular: 58.1

(licuado)

(botella)

Nº ICSC 0232
Nº CAS 106-97-8
Nº RTECS EJ4200000
Nº NU 1011
Nº CE 601-004-00-0



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con polvo, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. Utilídense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICION			
• INHALACION	Somnolencia. Pérdida del conocimiento.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
• PIEL	EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.	Guantes aislantes del frío. Traje de protección.	EN CASO DE CONGELACION: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
• OJOS	EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.	Pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
• INGESTION			

DERRAMES Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO

Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Eliminar toda fuente de ignición Ventilar. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.	Nu (transporte): Ver pictogramas en cabecera. Clasificación de Peligros NU: 2.1 CE: Nota: C símbolo F+ R: 12 S: 2-9-16-33
--	---	---



VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 0232 Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2003

Fichas Internacionales de Seguridad Química

BUTANO (gas licuado) ICSC: 0232

D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO: ASPECTO: Gas licuado comprimido inodoro,incoloro. PELIGROS FISICOS: El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas. LIMITES DE EXPOSICION: TLV: 800 ppm como TWA; (ACGIH 2003). MAK: 1000 ppm, 2400 mg/m³; Categoría de limitación de pico: II(4); IIc: No clasificado en cuanto a riesgo para el embarazo. (DFG 2003).	VIAS DE EXPOSICION: La sustancia se puede absorber por inhalación. RIESGO DE INHALACION: Al producirse pérdidas en zonas confinadas, este líquido se evapora muy rápidamente originando una saturación total del aire con grave riesgo de asfixia. EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION: La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: -0.5°C Punto de fusión: -138°C Densidad relativa (agua = 1): 0.6 Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 0.0061 Presión de vapor, kPa a 21.1°C: 213.7 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.1	Punto de inflamación: -60°C Temperatura de autoignición: 287°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.8-8.4 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.89
DATOS AMBIENTALES		

NOTAS

Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. La information excepto propiedades físicas también pueden aplicarse para el Isobutano (CAS 75-28-5). Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte.

Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1011
Código NFPA: H 1; F 4; R 0;

INFORMACION ADICIONAL

Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: <http://www.mtas.es/insht/practice/vlas.htm>

Última revisión IPCS: 2003
Traducción al español y actualización de valores límite y etiquetado:
2003
FISQ: 1-046

ICSC: 0232


BUTANO (gas licuado)

© CE, IPCS, 2003

NOTA LEGAL IMPORTANTE:

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

Fichas Internacionales de Seguridad Química

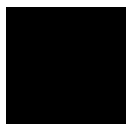
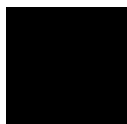
HIDROGENO			ICSC: 0001
			Marzo 2002
CAS:	1333-74-0	H ₂	
RTECS:	MW8900000	Masa molecular: 2.0	
NU:	1049		
CE Índice Anexo I:	001-001-00-9		
CE / EINECS:	215-605-7		

TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas. No manipular las botellas con las manos grasientas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.

EXPOSICIÓN			
Inhalación	Asfixia.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Congelación grave.	Guantes aislantes del frío.	Proporcionar asistencia médica.
Ojos		Gafas de protección de seguridad.	
Ingestión			

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
Eliminar toda fuente de ignición Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar el vapor con agua pulverizada.	Clasificación UE Símbolo: F+ R: 12 S: (2-)9-16-33 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1049 Código NFPA: H 0; F 4; R 0;	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.

IPCS
International
Programme on
Chemical Safety



Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2005

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

HIDROGENO

ICSC: 0001

DATOS IMPORTANTES

ESTADO FÍSICO; ASPECTO:

Gas comprimido inodoro e incoloro.

PELIGROS FÍSICOS:

El gas se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas. El gas es más ligero que el aire.

PELIGROS QUÍMICOS:

El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. Reacciona violentamente con aire, oxígeno, halógenos y oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión. Los metales catalizadores tales como el platino o el níquel aumentan este tipo de reacciones.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN:

TLV: asfixiante simple (ACGIH 2002).

VÍAS DE EXPOSICIÓN:

La sustancia se puede absorber por inhalación.

RIESGO DE INHALACIÓN:

Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:

Asfixiante simple. Véanse Notas.

PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: -253 °C

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.07

Punto de inflamación: gas inflamable

Temperatura de autoignición: 500-571 °C

Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4-76

DATOS AMBIENTALES

NOTAS

Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. A concentraciones tóxicas no hay alerta por el olor. Medir concentraciones de hidrógeno con un detector de gas adecuado (un detector de gas inflamable normal no es adecuado).

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

Notas: Asfixiante simple

Nota legal

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

FICHA DE SEGURIDAD
Gasóleo B

Producto: Gasóleo

Revisado: 05/03/2012 Revisión nº 8

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO	
Nombre químico	Gasóleo
Nombre comercial:	Gasóleo B
Sinónimos:	Combustible para motor diesel; gasóleo. Gasóleo de automoción
Fórmula:	Mezcla compleja de hidrocarburos del petróleo
Uso:	Ver Anexo
Nº Registro:	NP
Nª CAS:	NP
Nª CE (EINECS):	NP
Nº Anexo I (Dir. 67/548/CEE):	NP
<div> <div> Empresa: Saras Energía, S.A. Plaza Carlos Trías Bertrán, nº 4, 2ª planta 28020 Madrid (España) </div> <div> Tfno: 917027200 Fax: 913102077 </div> </div>	
<div> <div></div> <div> Instituto Nacional de Toxicología 91.562.04.20 </div> </div>	

2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	
FÍSICO/QUÍMICOS	TOXICOLÓGICOS (SÍNTOMAS)
Combustible si se calienta por encima de su punto de inflamación	<p>Inhalación: Nocivo por inhalación. La exposición repetida y prolongada a altas concentraciones de vapor causa irritación de las vías respiratorias y alteraciones del sistema nervioso central. En casos extremos puede dar lugar a neumonía química.</p>
	<p>Ingestión / Aspiración: Causa irritación en garganta y estómago. La aspiración de gasóleo a los pulmones puede producir daño pulmonar.</p>
	<p>Contacto piel / ojos: Irrita la piel. El contacto prolongado y repetido puede producir irritación y causar dermatitis. El contacto con los ojos puede causar irritación si se produce en altas concentraciones.</p>
	<p>Efectos tóxicos generales: Nocivo por inhalación. Irrita la piel. Peligro de aspiración hacia los pulmones. Los efectos más comunes son irritación de las vías respiratorias, ojos y piel. Posibles efectos cancerígenos. Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.</p>

3. COMPOSICIÓN

Composición general: Combinación compleja de hidrocarburos producida por la destilación del petróleo crudo. Compuesta de hidrocarburos con un número de carbonos en su mayor parte dentro del intervalo de C₉ A C₂₀ y con un intervalo de ebullición aproximado de 163°C a 357°C. Contiene un colorante.

Componentes peligrosos (Dir.67/548/CEE o Dir.1999/45/CE)	Rango %	Clasificación	Frases S
Combustibles para motor diesel; gasóleo. Nº CAS # 68334-30-5 Nº CE (EINECS) # 269-822-7 Nº Anexo I (Dir. 67/548/CEE) # 649-224-00-6 Nº Registro: 01-2119484664-27-0075	> 90	Xn; R20 Xi; R38 Carc.Cat. 3; R40 Xn; R65 N; R51/53	S23-24-36/37-51-61
Componentes peligrosos Reg.(CE) 1272/2008 (CLP)	Rango %	Indicaciones de peligro	Consejos de Prudencia
Combustibles para motor diesel; gasóleo. Nº CAS # 68334-30-5 Nº CE (EINECS) # 269-822-7 Nº Anexo I (Dir. 67/548/CEE) # 649-224-00-6 Nº Registro: 01-2119484664-27-0075	> 90	H226; H304; H315; H332; H351; H373; H411	P210; P261; P280; P301+P310; P331; P501

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Trasladar al afectado a una zona de aire fresco. Si la respiración es dificultosa aplicar respiración artificial o aplicar oxígeno.

Ingestión/Aspiración: NO INDUCIR EL VÓMITO para evitar la aspiración hacia los pulmones. En caso de entrada accidental de pequeñas cantidades de producto a la boca es suficiente el enjuague de la misma hasta la desaparición del sabor.

Contacto piel/ojos: Quitar inmediatamente la ropa impregnada. Lavar las partes afectadas con agua y jabón. En caso de contacto con los ojos, lavar abundantemente con agua durante unos 15 minutos. Solicitar asistencia médica.

Medidas generales: Solicitar asistencia médica.

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

Medidas de extinción: Agua pulverizada, espuma, polvo químico, CO₂.

NO UTILIZAR NUNCA CHORRO DE AGUA DIRECTO.

Contraindicaciones: NP

Productos de combustión: CO, CO₂, H₂O, hidrocarburos inquemados, hollín.

Medidas especiales: mantener alejados de la zona de fuego los recipientes con producto. Enfriar los recipientes expuestos a las llamas. Si no se puede extinguir el incendio, dejar que se consuma controladamente. Consultar y aplicar planes de emergencia en caso de que existan.

Peligros especiales: Material combustible. Puede arder por calor, chispas, electricidad estática o llamas. El vapor puede alcanzar fuentes remotas de ignición e inflamarse. Los recipientes, incluso vacíos, pueden explotar con el calor desprendido por el fuego. Peligro de explosión de vapores en el interior, exterior o en conductos. Nunca verter a una alcantarilla o drenaje, puede inflamarse o explotar.

Equipos de protección: Prendas para lucha contra incendios resistentes al calor. Cuando exista alta concentración de vapores o humos utilizar aparato de respiración autónoma.

6. MEDIDAS EN CASO DE LIBERACIÓN ACCIDENTAL

Precauciones para el medio ambiente: Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático. Los vertidos forman una película sobre la superficie del agua impidiendo la transferencia de oxígeno.

Precauciones personales: Aislar el área. Eliminar todas las fuentes de ignición; evitar chispas, llamas o fumar en la zona afectada.

Detoxificación y limpieza: Derrames pequeños: secar la superficie con materiales ignífugos y absorbentes. Depositar residuos en contenedores cerrados para su posterior eliminación. Derrames grandes: evitar la extensión del líquido con barreras.

Protección personal: Guantes impermeables. Calzado de seguridad. Protección ocular en caso de riesgo de salpicaduras. Aparatos de respiración autónoma si es necesario.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO
Manipulación:

Precauciones generales: NO SE DEBE VENDER O ALMACENAR GASOIL EN RECIPIENTES NO APROPIADOS PARA ELLO. No se debe usar el producto para usos distintos de los especificados: combustible de automoción. Evitar la exposición a los vapores. En el trasvase, utilizar guantes y gafas para protección de salpicaduras accidentales. No fumar en las áreas de manipulación del producto. Para el trasvase utilizar equipos conectados a tierra.

Condiciones específicas: en lugares cerrados usar sistema de ventilación local eficiente y antideflagrante. En trabajos en tanques vacíos no se debe soldar o cortar sin haber vaciado, purgado los tanques y realizado pruebas de explosividad. Se deben emplear procedimientos especiales de limpieza y mantenimiento de los tanques para evitar la exposición a vapores y la asfixia.

Almacenamiento:

Temperatura y productos en descomposición: puede producir CO y vapores irritantes, en combustión incompleta.

Reacciones peligrosas: Material combustible.

Condiciones de almacenamiento: Guardar el producto en recipientes cerrados y etiquetados. Mantener los recipientes en lugares frescos y ventilados, alejados del calor y de fuentes de ignición. Mantener los recipientes alejados de oxidantes fuertes.

Materiales incompatibles: Oxidantes fuertes.

FICHA DE SEGURIDAD

Gasóleo B

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

Equipos de Protección Personal:

Protección respiratoria: máscara de protección respiratoria en presencia de vapores o equipo autónomo en altas concentraciones.

Protección cutánea: guantes impermeables y resistentes a hidrocarburos.

Protección ocular: gafas de seguridad, lavajos.

Otras protecciones: cremas protectoras para prevenir la irritación; duchas en el área de trabajo.

Precauciones generales: evitar el contacto prolongado y la inhalación de vapores.

Prácticas higiénicas en el trabajo: seguir las medidas de cuidado e higiene de la piel, lavando con agua y jabón frecuentemente y aplicando cremas protectoras.

Controles de exposición:

Gasóleo:

TLV/TWA (ACGIH): 100mg/m³

Umbral olfativo de detección: 0.25 ppm

Límites de exposición:

DNEL: Ver anexo

PNEC: Ver anexo

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Aspecto: líquido oleoso.

Color: rojo

pH: NP

Olor: característico

Punto de ebullición: PE (65%): 250°C mín.
PE (95%): 370°C máx. (ASTM D-86)

Punto de fusión/congelación: NP

Punto de inflamación/inflamabilidad: 60°C mín. (ASTM D-93)

Autoinflamabilidad: 257°C

Propiedades explosivas: Límite inferior explosivo: 1.3%
Límite superior explosivo: 6%

Propiedades comburentes: NP

Presión de vapor: (Reis) 0,004 atm.

Densidad: 0,820-0,880 g/cm³ a 15°C (ASTM D-4052)

Tensión superficial: 25 dinas/cm a 25°C

Viscosidad: 2-4,5 cSt. a 40°C (ASTM D-445)

Densidad de vapor: 3,4 (aire:1)

Coef. Reparto (n-octanol/agua): NP

Hidrosolubilidad: Muy baja

Solubilidad: en disolventes del petróleo

Otros datos: Azufre: 1000ppm

Punto de obstrucción filtro frío: -10°C (invierno) 0°C (verano)

Calor de combustión: -43960 Kj/Kg (ASTM D-4529)

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad: producto estable a temperatura ambiente.
Combustible por encima de su punto de ebullición.

Condiciones a evitar: exposición a llamas, chispas, calor.

Incompatibilidades: oxidantes fuertes.

Productos de combustión/descomposición peligrosos: CO₂, H₂O, CO (en caso de combustión incompleta), hidrocarburos inquemados

Riesgo de polimerización: NP

Condiciones a evitar: NP

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Vías de entrada: la inhalación es la ruta más frecuente de exposición. Contacto con la piel, ojos e ingestión son otras vías probables de exposición.

Efectos agudos y crónicos: Nocivo por inhalación. Irrita la piel. La aspiración a los pulmones como consecuencia de la ingestión o el vómito es muy peligrosa. La inhalación produce irritación de las vías respiratorias y el contacto prolongado y repetido irritación de piel y ojos. Posibles efectos cancerígenos.

DL₅₀>9 ml/Kg (oral-rata)

CL₅₀>4,1 mg/l (inhalación-rata)

DL₅₀>5 ml/Kg (piel-conejo)

Carcinogenicidad: Clasificación CE: Categoría 3 (Sustancias cuyos posibles efectos carcinogénicos en el hombre son preocupantes, pero de las que no se dispone de información suficiente para realizar una evaluación satisfactoria).

Toxicidad para la reproducción: no existen evidencias de toxicidad para la reproducción en mamíferos.

Condiciones médicas agravadas por la exposición: problemas respiratorios y afecciones dermatológicas. No se debe ingerir alcohol dado que promueve la absorción intestinal de los gasóleos.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Forma y potencial contaminante:

Persistencia y degradabilidad: Liberado en el medio ambiente los componentes más ligeros tenderán a evaporarse y fotooxidarse por reacción con los radicales hidroxilos, el resto de los componentes más pesados también pueden estar sujetos a fotooxidación pero lo normal es que sean absorbidos por el suelo o sedimentos. Liberado en el agua flota y se separa y aunque es muy poco soluble en agua, los componentes más solubles podrán disolverse y dispersarse. En suelos y sedimentos, bajo condiciones aeróbicas, la mayoría de los componentes del gasóleo están sujetos a procesos de biodegradación, siendo en condiciones anaerobias más persistentes. Posee un DBO de 8% en cinco días.

Movilidad/Bioacumulación: Los log K_{ow} de los componentes del gasóleo sugieren su bioacumulación, pero los datos de literatura demuestran que esos organismos testados son capaces de metabolizar los hidrocarburos del gasóleo.

Efecto sobre el medio ambiente: Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

Métodos de eliminación de la sustancia (excedentes): combustión o incineración.

Residuos:

Eliminación: los materiales muy contaminados se deben incinerar. Los menos contaminados pueden ser depositados en vertederos controlados. Remitirse a un gestor autorizado.

Manipulación: los materiales contaminados por el producto presentan los mismos riesgos y necesitan las mismas precauciones que el producto y deben considerarse como residuo tóxico y peligroso. No desplazar nunca el producto a drenaje o alcantarillado.

Disposiciones: los establecimientos y empresas que se dediquen a la recuperación, eliminación, recogida o transporte de residuos deberán cumplir las disposiciones autonómicas, nacionales o comunitarias en vigor, relativas a la gestión de residuos.

14. CONSIDERACIONES RELATIVAS AL TRANSPORTE

Precauciones especiales: estable a temperatura ambiente y durante el transporte. Almacenar en lugares frescos y ventilados

Información complementaria:

Número ONU: UN 1202

Número de identificación del peligro: 30

Nombre de expedición: COMBUSTIBLE PARA MOTORES DIESEL
O GASÓLEO O ACEITE MINERAL PARA CALDEO LIGERO.

ADR/RID: Clase 3. Código de Clasificación: F1.

Grupo de embalaje: III

IATA-DGR: Clase 3. Grupo de embalaje: III

IMDG: Clase 3. Grupo de embalaje/envase: III.

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

CLASIFICACIÓN

(Dir.67/548/CEE o Dir.1999/45/CE)

Xn, R20

Xi;R38

Carc. Cat. 3; R40

Xn; R65

N; R51/53

ETIQUETADO

Símbolos: Xn, N

Frases R

R20: Nocivo por inhalación

R38: Irrita la piel

R40: Posibles efectos cancerígenos

R65: Nocivo: Si se ingiere puede causar daño pulmonar.

R51/53: Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

Frases S

S23: No respirar los gases/humos/vapores/aerosoles

S24: Evítese el contacto con la piel.

S36/37: Úsen se indumentaria y guantes de protección adecuados.

S51: Úsese únicamente en lugares bien ventilados

S61: Evítese su liberación al medio ambiente.

Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad



CLASIFICACIÓN

Reg.(CE)1272/2008 (CLP)

Líquidos inflamables: Líq. Inf. 3

Corrosión o irritación cutáneas:

Irrt. Cut.2

Toxicidad aguda: Tox. ag. 4

Peligro por aspiración: Tox.asp.1

Carcinogenicidad: Carc.2

Toxicidad específica en determinados órganos: STOT
repe.2

Peligroso para el medio ambiente
acuático: Acuático crónico 2

ETIQUETADO CLP

Pictogramas: GHS02 GHS07 GHS08 GHS09

Indicaciones de peligro

Palabra de advertencia: Peligro

H226: Líquidos y vapores inflamables.

H304: Puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias.

H315: Provoca irritación cutánea

H332: Nocivo en caso de inhalación



FICHA DE SEGURIDAD
Gasóleo B

H351: Se sospecha que provoca cáncer.

H373: Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.

H411: Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Consejos de prudencia:

P210: Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes - No fumar.

P261: Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.

P280: Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.

P301+P310: EN CASO DE INGESTIÓN: llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico.

P331: No provocar el vómito.

P501: Eliminar el contenido/recipiente en el contenedor habilitado para tal efecto conforme a la normativa vigente.



Otras regulaciones: NP

16. OTRAS INFORMACIONES
Bases de datos consultadas

EINECS: European Inventory of Existing Commercial Substances.
 TSCA: Toxic Substances Control Act, US Environmental Protection Agency
 HSDB: US National Library of Medicine
 RTECS: US Dept. of Health & Human Services

Frases R/Indicaciones de Peligro incluidas en el documento: NP

Número de Registro: 01-2119471664-32-0031 (Nº CAS: 67762-38-3)

Normativa consultada

Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA)
 Reglamento (CE) no 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP).
 Reglamento (CE) no 1907/2006 relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH)
 Dir.67/548/CEE sobre clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas (incluyendo enmiendas y adaptaciones en vigor).
 Dir.1999/45/CEE sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos (incluyendo enmiendas y adaptaciones en vigor).
 Dir.91/689/CEE de residuos peligrosos / Dir.2008/98/CE de gestión de residuos.
 Real Decreto 363/95: Reglamento sobre notificaciones de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas.
 Real Decreto 255/2003: Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos.
 Acuerdo europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías peligrosas por carreteras (ADR).
 Reglamento relativo al Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril (RID).
 Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG).
 Regulaciones de la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA) relativas al transporte de mercancías peligrosas por vía aérea.

Glosario

CAS: Servicio de Resúmenes Químicos
 IARC: Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
 ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists
 TLV: Valor Límite Umbral
 TWA: Media Ponderada en el Tiempo
 STEL: Límite de Exposición de Corta Duración
 REL: Límite de Exposición Recomendado
 PEL: Límite de Exposición Permitido
 INSHT: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
 VLA-ED: Valor Límite Ambiental-Exposición Diaria

VLA-EC: Valor Límite Ambiental-Exposición Corta
 DNEL/DMEL: Nivel sin efecto derivado / Nivel derivado con efecto mínimo.

PNEC: Concentración prevista sin efecto
 DL₅₀: Dosis Letal Media
 CL₅₀: Concentración Letal Media
 CE₅₀: Concentración Efectiva Media
 CI₅₀: Concentración Inhibitoria Media
 BOD: Demanda Biológica de Oxígeno
 NP: No Pertinente
 I: cambios respecto a la revisión anterior

La información que se suministra en este documento se ha recopilado en base a las mejores fuentes existentes y de acuerdo con los últimos conocimientos disponibles y con los requerimientos legales vigentes sobre clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas. Esto no implica que la información sea exhaustiva en todos los casos. Es responsabilidad del usuario determinar la validez de esta información para su aplicación en cada caso.

ANEXO**DNELs para trabajadores**

Efecto sistémico, exposición aguda, Dérmica (mg/kg bw/día): Ningún peligro identificado para esta ruta

Efecto sistémico, exposición aguda, Inhalación (mg/m³/15 min): 4300

Efecto local, exposición aguda, Dérmica (mg/kg bw/día): Ningún peligro identificado para esta ruta

Efecto local, exposición aguda, Inhalación (mg/m³/15 min): Ningún peligro identificado para esta ruta

Efecto sistémico, exposición prolongada, Dérmica (mg/kg /8h): 2,9

Efecto sistémico, exposición prolongada, Inhalación (mg aerosol/m³/8h): 68

Efecto local, exposición prolongada, Dérmica (mg/kg bw /día): Ningún peligro identificado para esta ruta para exposiciones de 13 semanas ni tampoco efecto umbral y/o ninguna información de respuesta a dosis disponible para exposiciones crónicas.

Efecto local, exposición prolongada, Inhalación (mg/m³/8 h): Ningún peligro identificado para esta ruta

DNELs para la población

Efecto sistémico, exposición aguda, Dérmica (mg/kg bw/día): Ningún peligro identificado para esta ruta

Efecto sistémico, exposición aguda, Inhalación (mg/m³/15 min): 2600

Efecto local, exposición aguda, Dérmica (mg/kg bw/día): Ningún peligro identificado para esta ruta

Efecto local, exposición aguda, Inhalación (mg/m³/15 min): Ningún peligro identificado para esta ruta

Efecto sistémico, exposición prolongada, Dérmica (mg/kg /día): 1,3

Efecto sistémico, exposición prolongada, Inhalación (mg aerosol/m³/día): 20

Efecto local, exposición prolongada, Dérmica (mg/kg bw /día): Ningún peligro identificado para esta ruta para exposiciones de 13 semanas ni tampoco efecto umbral y/o ninguna información de respuesta a dosis disponible para exposiciones crónicas.

Efecto local, exposición prolongada, Inhalación (mg/m³/24 h): Ningún peligro identificado para esta ruta

PNEC agua, sedimentos, suelos, STP

Esta sustancia es un hidrocarburo de composición compleja, desconocida o variable. Los métodos convencionales utilizados para calcular las concentraciones de PNEC no convienen y resulta imposible identificar una sola concentración de PNEC típica para tales sustancias.

PNEC Envenenamiento secundario oral

No se necesitan derivados de PNEC porque esta sustancia no está clasificada como Muy Tóxica (T+) o Tóxica (T) o Dañina con al menos R48, R62, R63, R64.

Fichas Internacionales de Seguridad Química

METANO

ICSC: 0291



METANO
CH₄

Masa molecular: 16.0

Nº CAS 74-82-8
Nº RTECS PA1490000
Nº ICSC 0291
Nº NU 1971;1972
Nº CE 601-001-00-4



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo. En otros casos apagar con agua pulverizada, polvo o dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICION			
• INHALACION	Pérdida del conocimiento.	Ventilación. A altas concentraciones protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.
• PIEL	Congelación grave.	Guantes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACION: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa y proporcionar asistencia médica.
• OJOS			
• INGESTION			

DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco. Ventilación a ras del suelo y techo.	símbolo F+ R: 12 S: (2-)9-16-33 Clasificación de Peligros NU: 2.1



VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 0291

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

Fichas Internacionales de Seguridad Química

METANO

ICSC: 0291

D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO; ASPECTO Gas licuado comprimido incoloro e inodoro.	VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación.
	PELIGROS FISICOS El gas es más ligero que el aire.	RIESGO DE INHALACION Al producirse pérdidas en zonas confinadas este gas puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno del aire.
	PELIGROS QUIMICOS	EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION El contacto con el líquido o gas comprimido, puede causar congelación.
	LIMITES DE EXPOSICION TLV: asfixiante simple (ACGIH 1992-1993).	EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: -161°C Punto de fusión: -183°C Solubilidad en agua, ml/100 ml a 20°C: 3.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.6	Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 537°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 5-15
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
Densidad del líquido en el punto de ebullición: 0.42 kg/l. La sustancia puede desplazarse hasta la fuente de ignición, retrocediendo e incendiándose. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Una vez utilizado para la soldadura, cerrar la válvula; verificar regularmente el estado de la tubería, etc., y comprobar si existen escapes utilizando agua y jabón. Las medidas mencionadas en la Sección PREVENCIÓN son aplicables a la producción, llenado de botellas y almacenamiento del gas. <div>Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-622, 20G04 Código NFPA: H 1; F 4; R 0;</div>		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 3-137 METANO		
ICSC: 0291		METANO
© CCE, IPCS, 1994		
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).	

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 1 de 8

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1. Identificador del producto

2664842 n-Hexadecano

N.º CAS: 544-76-3
N.º índice: 603-027-00-1
N.º CE: 208-878-9

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Uso de la sustancia o de la mezcla

Análisis del agua

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía: HACH LANGE GmbH
Calle: Willstätterstr. 11
Población: D-40549 Düsseldorf
Teléfono: +49 (0)211 5288-383
Correo elect.: SDS@hach-lange.de
Página web: www.hach-lange.com
Departamento responsable: HACH LANGE S.L.U.
Edif. Seminario; C/Larrauri, 1C-2ª Pl.
E-48160 Derio/Bizkaia
Tel. +34 9 46573388
e-Mail: info@hach-lange.es

1.4. Teléfono de emergencia: + 34 91 562 04 20 - 24h/365 días - (solo emergencias toxicológicas)

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Indicadores de peligro: Xi - Irritante
Frases R:
Irrita los ojos y la piel.

Clasificación SGA

Categorías del peligro:
Corrosión o irritación cutáneas: Irrit. cut. 2
Lesiones oculares graves o irritación ocular: Irrit. oc. 2
Indicaciones de peligro:
Provoca irritación cutánea.
Provoca irritación ocular grave.

2.2. Elementos de la etiqueta

Palabra de advertencia: Atención
Pictogramas: GHS07



Indicaciones de peligro

H319 Provoca irritación ocular grave.
H315 Provoca irritación cutánea.

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 2 de 8

Consejos de prudencia

- P280 Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.
P302+P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.
P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
P332+P313 En caso de irritación cutánea: Consultar a un médico.
P362 Quitarse las prendas contaminadas y lavarlas antes de volver a usarlas.
P321 Se necesita un tratamiento específico (ver . en esta etiqueta).

Indicaciones adicionales para el etiquetado

El producto está clasificado como peligroso de conformidad con el Reglamento (CE) n.º 1272/2008.

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes**3.1. Sustancias****Características químicas**
HEXADECANE**Componentes peligrosos**

N.º CE	Nombre químico	Cantidad
N.º CAS	Clasificación	
N.º índice	Clasificación SGA	
N.º REACH		
208-878-9	n-Hexadecano	100 %
544-76-3	Xi - Irritante R36/38	
	Skin Irrit. 2, Eye Irrit. 2; H315 H319	

El texto completo de las frases R y H se muestra en la sección 16.

SECCIÓN 4: Primeros auxilios**4.1. Descripción de los primeros auxilios****Indicaciones generales**

Quítese inmediatamente la ropa contaminada.
Consultar a un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

Si es inhalado

Sacar al aire libre. Si los síntomas persisten consultar a un médico.

En caso de contacto con la piel

Lavar inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos.

En caso de contacto con los ojos

Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos y consulte al médico.

Si es tragado

Lavar la boca con agua y después beber agua abundante. En caso de ingestión o vómitos, peligro de aspiración pulmonar.
Consultar a un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Narcosis
Tiene un efecto desengrasante sobre la piel.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Tratar sintomáticamente.

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 3 de 8

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

5.1. Medios de extinción

Medios de extinción adecuados

Dióxido de carbono (CO₂) Espuma Polvo seco Usar medidas de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores. El producto no arde por si mismo.

Medios de extinción no apropiados

Es posible que el agua no tenga efecto.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos. @N10.0030001,0
Dióxido de carbono (CO₂)

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

En caso de fuego, protéjase con un equipo respiratorio autónomo. Protección de la piel mediante observación de una distancia de seguridad y uso de ropa protectora adecuada.

Información adicional

Los restos del incendio así como el agua de extinción contaminada, deben eliminarse según las normas locales en vigor. Usar medidas de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores. El producto no arde por si mismo.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Utilícese equipo de protección individual.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

No echar al agua superficial o al sistema de alcantarillado sanitario.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza

Recojer con un producto absorbente inerte (por ejemplo, arena, diatomita, fijador de ácidos, fijador universal, serrín).

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Indicaciones para la manipulación segura

Utilícese solo en zonas bien ventiladas.

Indicaciones para prevenir incendios y explosiones

No se requieren medidas de protección especiales contra el fuego.

Indicaciones adicionales para la manipulación

Ninguna conocida.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Condiciones necesarias para almacenes y depósitos

Mantener el envase cerrado, en un lugar seco, fresco y bien ventilado.

Indicaciones respecto al almacenamiento conjunto

Incompatible con agentes oxidantes.

Información complementaria sobre las condiciones de almacenamiento

Mantenerlo encerrado en una zona únicamente accesible por las personas autorizadas o calificadas.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

8.1. Parámetros de control

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 4 de 8

Valores límite de exposición profesional

N.º CAS	Agente químico	ppm	mg/m³	fib/cc	Categoría	
544-76-3	n-Hexadecano		50		VLA-ED VLA-EC	

Datos adicionales sobre valores límites

No contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.

8.2. Controles de la exposición
Controles técnicos apropiados

Se requieren extractores en el lugar de emisión. Aplicar las medidas técnicas para cumplir con los límites profesionales de exposición.

Medidas de higiene

El tipo de equipamiento de protección debe ser elegido según la concentración y la cantidad de sustancia peligrosa al lugar específico de trabajo.

Protección de los ojos/la cara

Gafas protectoras con cubiertas laterales

Protección de las manos

Usar crema protectora para la piel.

Lavarse las manos antes de las pausas y después del trabajo.

En caso de un contacto completo: Caucho nitrilo

Espesor del guante: 0,4mm

Tiempo de perforación > 480 min

En caso de contacto por salpicaduras: Caucho nitrilo

Espesor del guante: 0,11mm

Tiempo de perforación > 30 min

Guantes protectores resistentes a los productos químicos.

Los guantes de protección indicados deben cumplir las especificaciones de la Directiva 89/686/EEC y con su resultante EN374.

Protección cutánea

Quitar y lavar la ropa contaminada antes de reutilizar.

Protección respiratoria

Cuando los trabajadores estén expuestos a concentraciones por encima de los límites de exposición, deberán usar mascarillas apropiadas certificadas. Aparato de respiración si se forma aerosol.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas
9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Estado físico:	líquido
Color:	incoloro
Olor:	ligero, similar a un hidrocarburo

Método de ensayo

pH (a 20 °C):	No hay información disponible.
---------------	--------------------------------

Cambio de estado

Temperatura de fusión:	18 °C
------------------------	-------

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 5 de 8

Temperatura de ebullición: 287 °C
Temperatura de sublimación: No hay información disponible.
Temperatura de reblandecimiento: No hay información disponible.
: No hay información disponible.
Punto de inflamación: 135 °C

Inflamabilidad

Sólido: No hay información disponible.
Gas: No hay información disponible.

Propiedades explosivas

No hay información disponible.

Límite inferior de explosividad: 0,4 % vol.
Límite superior de explosividad: 6,5 % vol.
Temperatura de inflamación: 215 °C

Temperatura de ignición espontánea

Sólido: No hay información disponible.
Gas: No hay información disponible.

Presión de vapor: < 0,1 hPa
(a 20 °C)

Presión de vapor: No hay información disponible.

Densidad (a 20 °C): 0,77 g/cm³

Solubilidad en agua: prácticamente insoluble
(a 20 °C)

Solubilidad en otros disolventes

No hay información disponible.

Coefficiente de reparto: 8,25

Viscosidad dinámica: No hay información disponible.

Viscosidad cinemática: 7 mm²/s
(a 40 °C)

Tiempo de vaciado: No hay información disponible.

Densidad de vapor: No hay información disponible.

Tasa de evaporación: No hay información disponible.

Test de separación de disolvente: No hay información disponible.

Contenido en disolvente: No hay información disponible.

9.2. Información adicional

Contenido sólido: No hay información disponible.

No hay información disponible.

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad**10.1. Reactividad**

Los vapores pueden formar una mezcla explosiva con el aire.

10.2. Estabilidad química

Estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.

10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas

Incompatible con agentes oxidantes.

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 6 de 8

10.4. Condiciones que deben evitarse

No se conoce reacciones peligrosas bajo condiciones de uso normales.

10.5. Materiales incompatibles

Oxidantes

10.6. Productos de descomposición peligrosos

 Dióxido de carbono (CO₂) Monóxido de carbono

SECCIÓN 11: Información toxicológica
11.1. Información sobre los efectos toxicológicos
Toxicocinética, metabolismo y distribución

Ningún efecto conocido.

Toxicidad aguda

Peligro de aspiración si es tragado - puede entrar en los pulmones y provocar lesiones. Aspiración puede causar edema pulmonar y neumonía.

N.º CAS	Nombre químico				
	Vía de exposición	Método	Dosis	Especies	Fuente
544-76-3	n-Hexadecano				
	dérmica	DL50	100 mg/kg	ratas	

Irritación y corrosividad

Irritación cutáneas

Efectos sensibilizantes

Ningún efecto conocido.

Efectos graves tras exposición repetida o prolongada

Tiene un efecto desengrasante sobre la piel.

Carcinogenicidad, mutagenicidad y toxicidad para la reproducción

Ningún efecto conocido.

Efectos específicos en experimentos con animales

Ningún efecto conocido.

Consejos adicionales referente a las pruebas

Ningún efecto conocido.

SECCIÓN 12: Información ecológica
12.1. Toxicidad

No hay datos disponibles sobre este producto.

No echar al agua superficial o al sistema de alcantarillado sanitario.

12.2. Persistencia y degradabilidad

Ningún efecto conocido.

12.3. Potencial de bioacumulación

Ningún efecto conocido.

Coefficiente de reparto n-octanol/agua

N.º CAS	Nombre químico	Log Pow
544-76-3	n-Hexadecano	8,25

12.4. Movilidad en el suelo

Ningún efecto conocido.

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 7 de 8

12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB

Ningún efecto conocido.

12.6. Otros efectos adversos

Ningún efecto conocido.

Indicaciones adicionales

Ningún efecto conocido.

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación**13.1. Métodos para el tratamiento de residuos****Eliminación**

De conformidad con las regulaciones locales y nacionales.

Código de identificación de residuo-Desechos de residuos / producto no utilizado

160506 RESIDUOS NO ESPECIFICADOS EN OTRO CAPÍTULO DE LA LISTA; Gases en recipientes a presión y productos químicos desechados; Productos químicos de laboratorio que consisten en, o contienen, sustancias peligrosas, incluidas las mezclas de productos químicos de laboratorio
Considerado como residuo peligroso.

Código de identificación de residuo-Residuos

160506 RESIDUOS NO ESPECIFICADOS EN OTRO CAPÍTULO DE LA LISTA; Gases en recipientes a presión y productos químicos desechados; Productos químicos de laboratorio que consisten en, o contienen, sustancias peligrosas, incluidas las mezclas de productos químicos de laboratorio
Considerado como residuo peligroso.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte**Transporte terrestre (ADR/RID)****Otra información pertinente (transporte terrestre)**

No sometido a las normas de transporte.

Transporte fluvial (ADN)**Otra información pertinente (transporte fluvial)**

no ensayado

Transporte marítimo (IMDG)**Otra información pertinente (transporte marítimo)**

No sometido a las normas de transporte.

Transporte aéreo (ICAO)**Otra información pertinente (transporte aéreo)**

No sometido a las normas de transporte.

14.5. Peligros para el medio ambiente

Peligroso para el medio ambiente: no

SECCIÓN 15: Información reglamentaria**15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla****Información reglamentaria EU****Indicaciones adicionales**

Clasificación de acuerdo con la directiva europea 67/548/CEE o 1999/45/CE

El producto está clasificado como peligroso de conformidad con el Reglamento (CE) n.º 1272/2008.

Ficha de datos de seguridad

de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1907/2006

2664842 n-Hexadecano

Fecha: 02.08.2013

Código del producto: 2664842

Página 8 de 8

Legislación nacional

Clasificación como contaminante
acuático (D):

1 - Ligeramente peligroso para el agua

SECCIÓN 16: Otra información

Texto completo de las frases R usadas en las secciones 2 y 3

36/38 Irrita los ojos y la piel.










Texto completo de las indicaciones de peligro usadas en las secciones 2 y 3

H315 Provoca irritación cutánea.

H319 Provoca irritación ocular grave.

Indicaciones adicionales

La información aquí dada se basa en nuestros conocimientos a fecha actual, sin embargo no garantiza características o propiedades del producto y no da pie a una relación contractual jurídica.

SULFURO DE HIDRÓGENO			ICSC: 0165 Abril 2000
CAS: RTECS: NU: CE Índice Anexo I: CE / EINECS:	7783-06-4 MX1225000 1053 016-001-00-4 231-977-3	Hidruro de azufre Ácido sulfhídrico H ₂ S Masa molecular: 34.1	  
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo seco, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS!
Inhalación	Dolor de cabeza. Vértigo. Tos. Dolor de garganta. Náuseas. Dificultad respiratoria. Pérdida del conocimiento. Síntomas no inmediatos (ver Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Posición de semiincorporado. Respiración artificial si estuviera indicada. No aplicar respiración boca a boca. Proporcionar asistencia médica.
Piel	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Guantes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Quemaduras profundas graves.	Gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Eliminar toda fuente de ignición. Ventilar. Eliminar el gas con agua pulverizada. Protección personal: traje hermético de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración.		Clasificación UE Símbolo: F+, T+, N R: 12-26-50 S: (1/2-)-9-16-36-38-45-61 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.3 Riesgos Subsidiarios de las NU: 2.1	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20G2TF o 20S1053 Código NFPA: H4; F4; R0;		A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco. Mantener en lugar bien ventilado. Instalar sistema de vigilancia con alarma continuo.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005			
<div><div>IPCS International Programme on Chemical Safety</div><div></div></div>			

SULFURO DE HIDRÓGENO		ICSC: 0165
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Gas licuado comprimido incoloro, de olor característico a huevos podridos.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. La sustancia se descompone al arder, produciendo gas tóxico (óxidos de azufre). Reacciona violentamente con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión. Ataca a metales y algunos plásticos.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 10 ppm como TWA; 15 ppm como STEL (ACGIH 2004). MAK: 5 ppm, 7.1 mg/m³; Categoría de limitación de pico: I(2); Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2006).</p>		<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Al producirse una pérdida de gas, se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La exposición puede producir pérdida del conocimiento. La exposición puede producir la muerte. La inhalación del gas puede originar edema pulmonar (ver Notas). Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica. La evaporación rápida del líquido puede producir congelación.</p>
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: -60°C Punto de fusión: -85°C Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 0.5 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.19</p>		<p>Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 260°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4.3-46</p>
DATOS AMBIENTALES		
<p>La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos.</p>		
NOTAS		
<p>Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles. En caso de envenenamiento con esta sustancia es necesario realizar un tratamiento específico; así como disponer de los medios adecuados junto a las instrucciones correspondientes. La sustancia bloquea el sentido del olfato. La alerta por el olor cuando se supera el límite de exposición es insuficiente. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2004: ver Clasificación UE, Respuesta de Emergencia, y en octubre de 2006: ver Límites de exposición.</p>		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2012):</p> <p>VLA-ED: 5 ppm; 7 mg/m³</p> <p>VLA-EC: 10 ppm, 14 mg/m³</p> <p>Notas: agente químico que tiene establecido un valor límite indicativo por la UE.</p>		
NOTA LEGAL		<p>Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.</p>
© IPCS, CE 2005		

Documento II:

PLANOS.

ÍNDICE DE LOS PLANOS

PLANO 1: Distribución general en planta

PLANO 2: Torre de rectificación

PLANO 3: Botellón de reflujo

PLANO 4: Plato de rectificación

PLANO 5: Plato de agotamiento

PLANO 6: Fondo superior

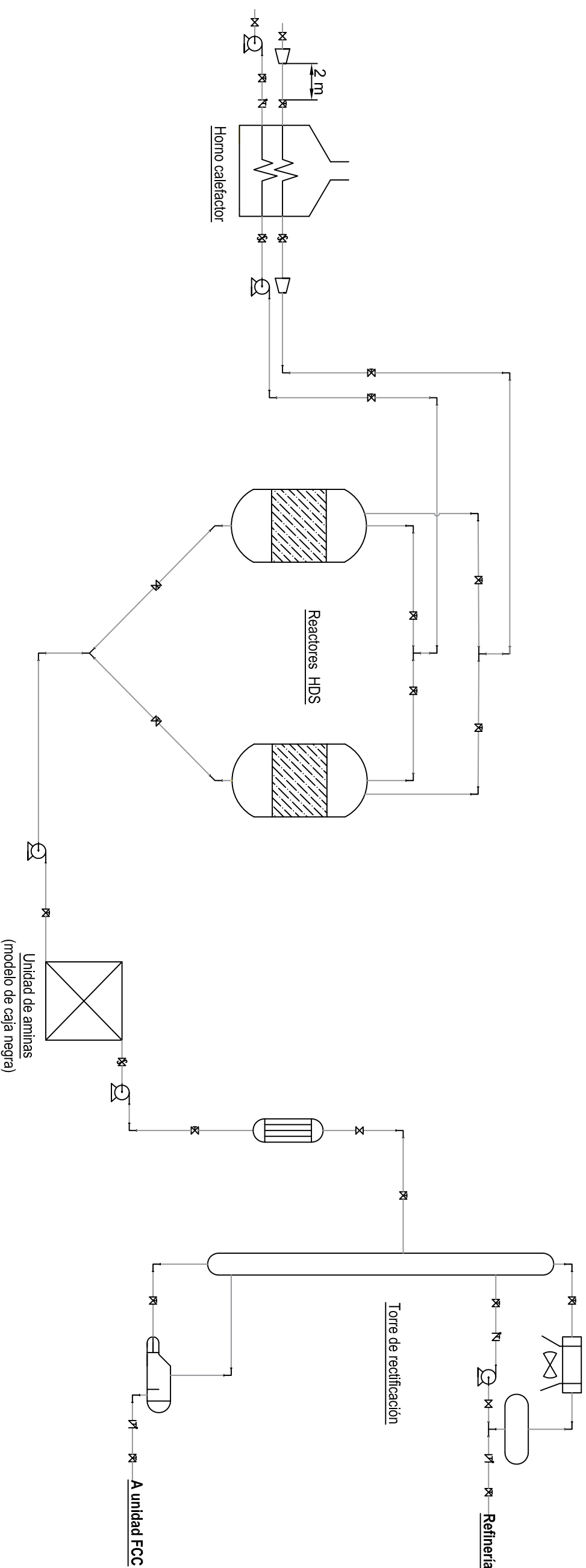
PLANO 7: Fondo inferior

PLANO 8: Intercambiador ICA

PLANO 9: Intercambiador CV

PLANO 10: Reactor HDS

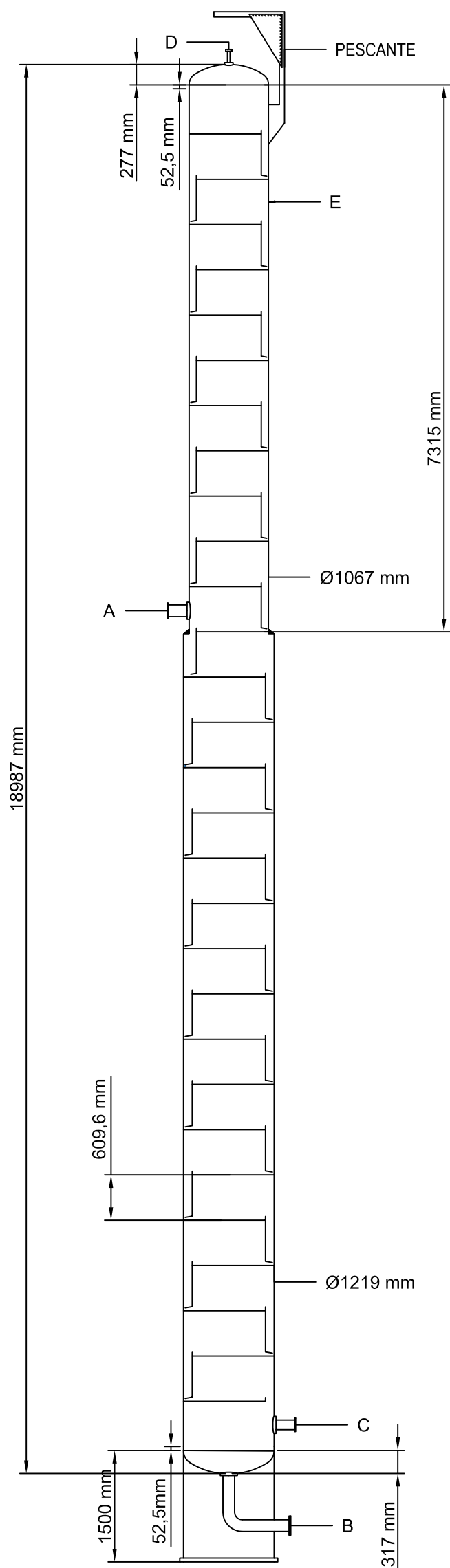
PLANO 11: Intercambiador AE



⌘	Válvula de compuerta
⌘	Válvula de globo
⌘	Válvula de retención
⌘	Válvula de seguridad
⌘	Compresor
⌘	Bomba centrífuga
⌘	Intercambiador ICA
⌘	Aerorefrigerador
⌘	Acumulador de reflujo
⌘	Calderín CV
⌘	Codo 90°
⌘	Bifurcación en T

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: ESQUEMA GENERAL DE LÍNEA DE PROCESO	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla			Universidad de Cádiz	
FECHA: 17 / 12 / 2014			Facultad de Ciencias	
ESCALA: 1 : 250				
PLANO n.º: JCRT-001/011				
INGENIERO QUÍMICO				





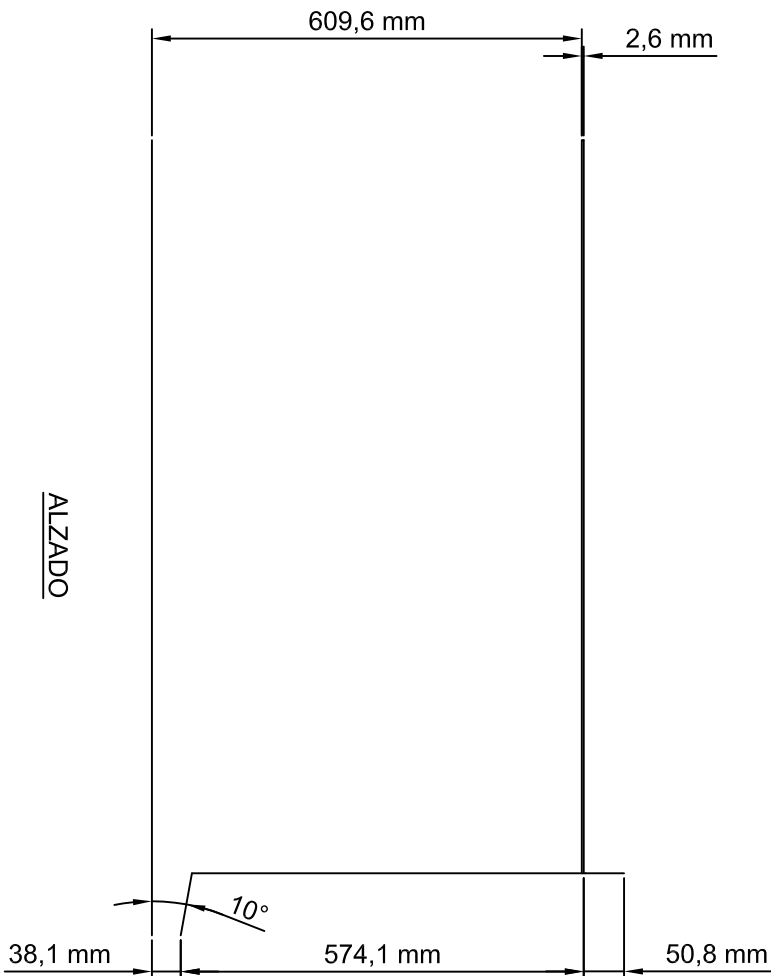


MATERIALES	
CARCASA	SA 285 Gr C

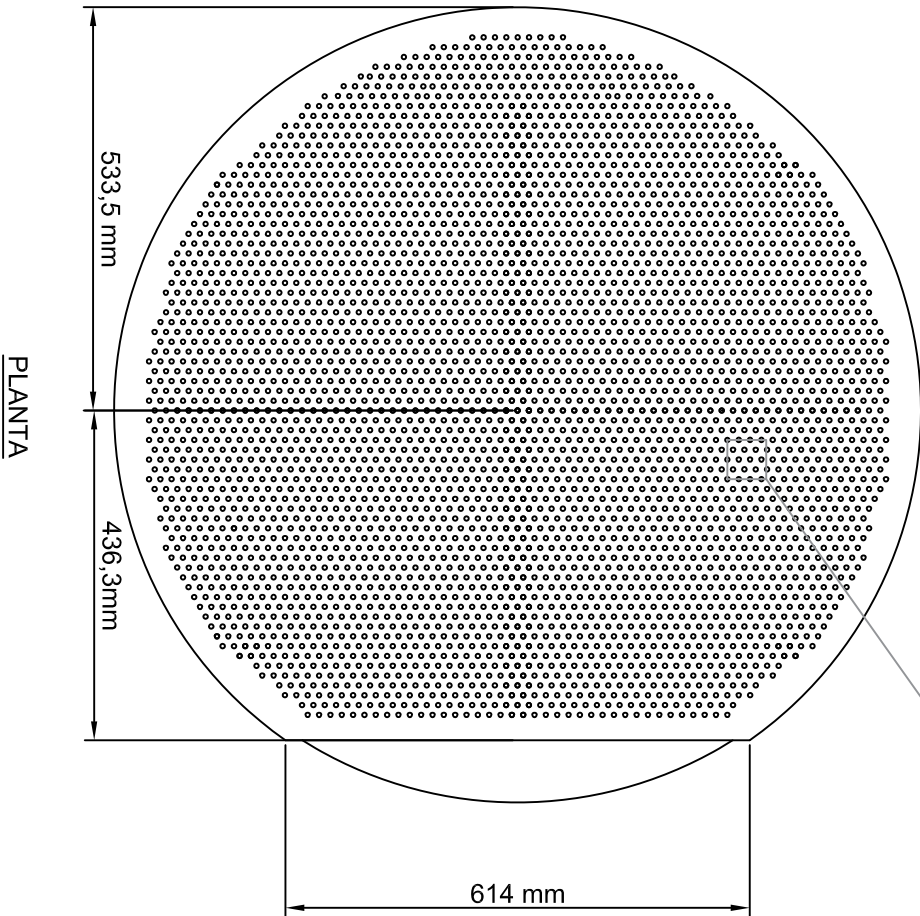
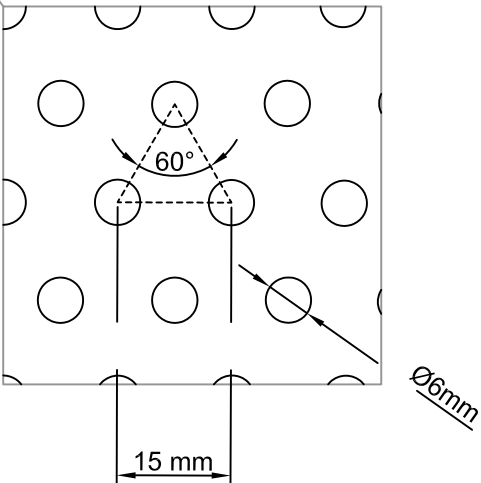
CORRIENTES	
A	ENTRADA DE ALIMENTACIÓN
B	SALIDA CORRIENTE DE COLAS
C	ENTRADA CORRIENTE PARCIALMENTE VAPORIZADA
D	SALIDA CORRIENTE DE CABEZAS
E	ENTRADA CORRIENTE DE REFLUJO

DATOS DE DISEÑO	
CÓDIGO	ASME VIII Dv.1
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	180,2 °C
PRESIÓN DE OPERACIÓN	14,25 bar
TEMPERATURA DE DISEÑO	200,2 °C
PRESIÓN DE DISEÑO	15,68 bar
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm
ESPECIF. MATERIAL DE COLUMNA	SA 285 Gr C
ESPECIF. DE AISLAMIENTO	LANA DE ROCA
ESPECIF. DE AISLAMIENTO	80 mm





PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: DISEÑO DE COLUMNA DE RECTIFICACIÓN	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla			Universidad de Cádiz	Facultad de Ciencias
FECHA: 17 / 12 / 2014	ESCALA: 1 : 70	PLANO nº: JCRT-002/011		
INGENIERO QUÍMICO				

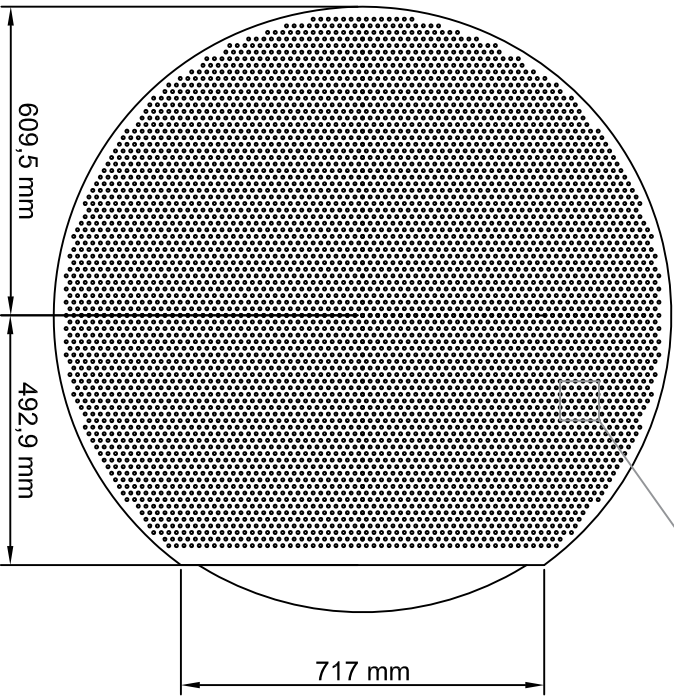
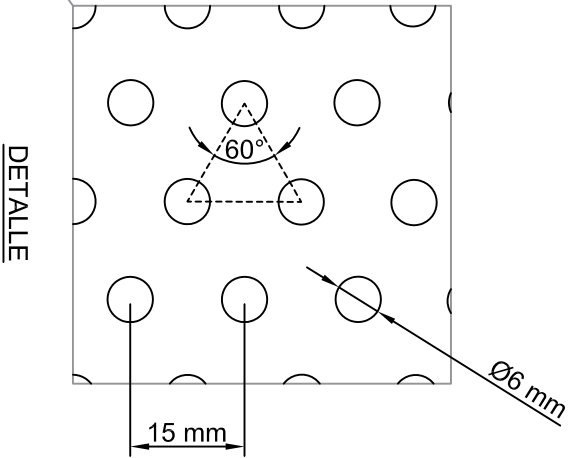
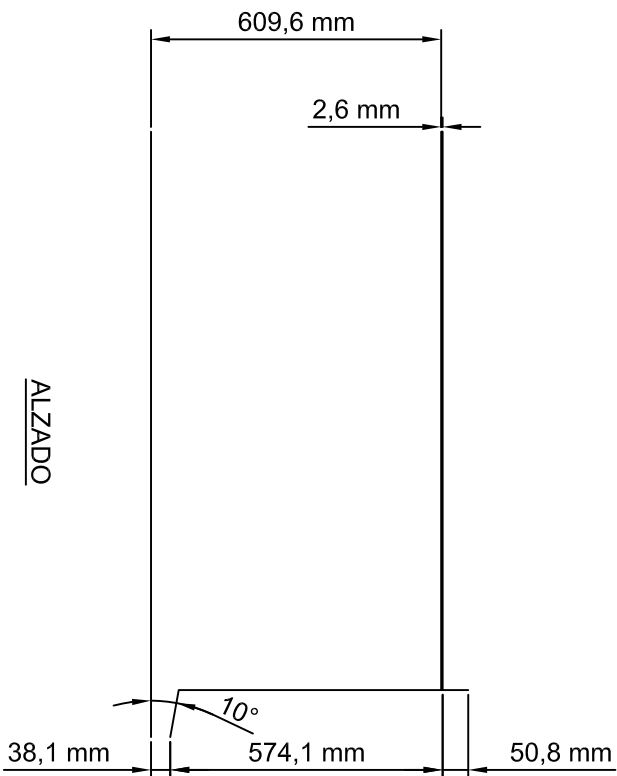


DETALLE



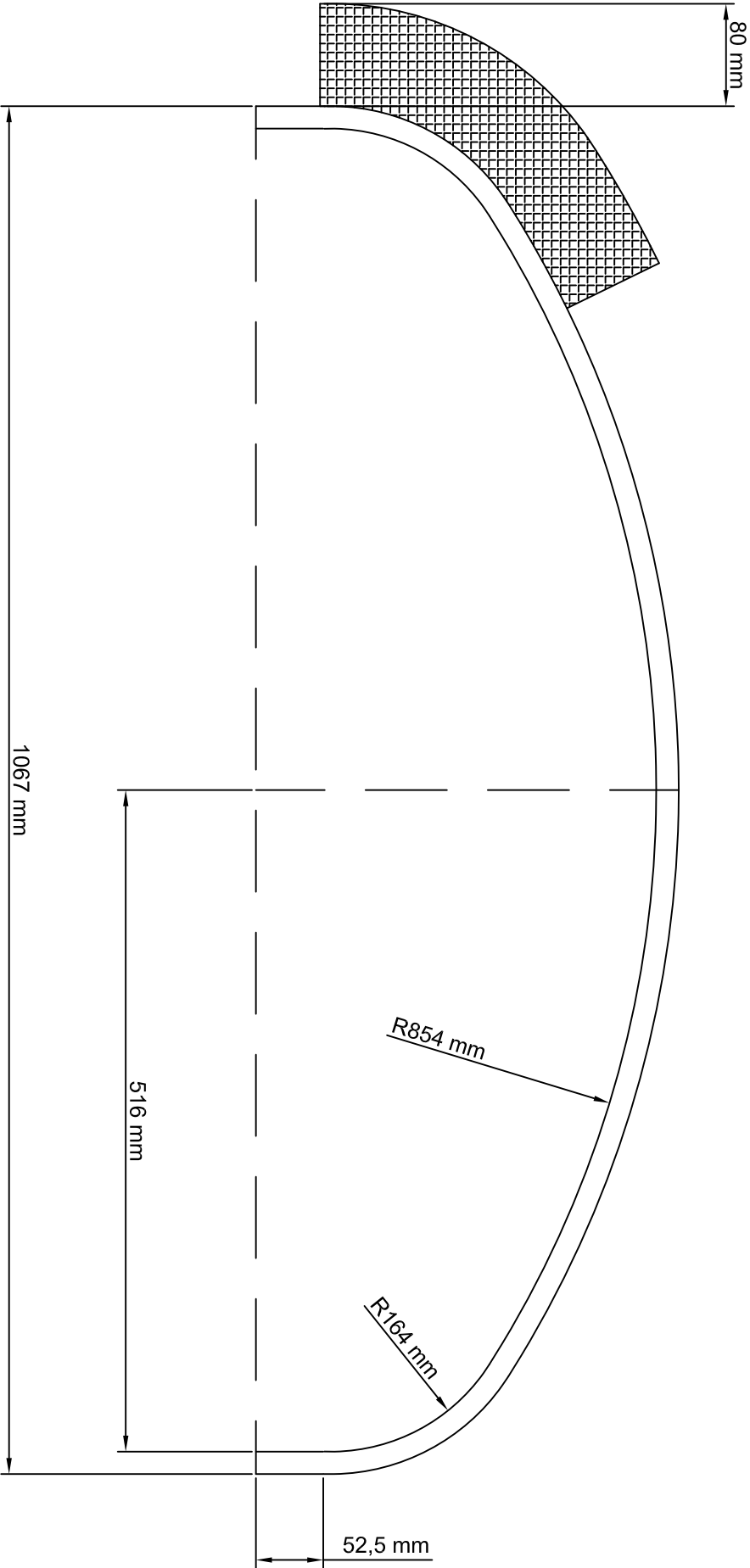
DATOS DE DISEÑO	
CÓDIGO	ASME VIII DV.1
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	180,2 °C
PRESIÓN DE OPERACIÓN	14,25 bar
TEMPERATURA DE DISEÑO	200,2 °C
PRESIÓN DE DISEÑO	15,68 bar
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm
ESPECIF. MATERIAL DE COLUMNA	SA 285 Gr C

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.		PLANO: DISEÑO PLATO DE RECTIFICACIÓN	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla		Universidad de Cádiz	
FECHA: 17 / 12 / 2014		ESCALA: 1 : 10	PLANO n.º: JCRT-004/011
INGENIERO QUÍMICO		Facultad de Ciencias	
		<div><div><div>Universidad de Cádiz</div></div><div><div><div>UCA</div><div>Universidad de Cádiz</div></div><div><div><div>Biología Ingeniería Química Matemáticas Química</div></div><div><div><div>ciencias para el Campus de Puerto Real</div></div></div></div></div></div>	



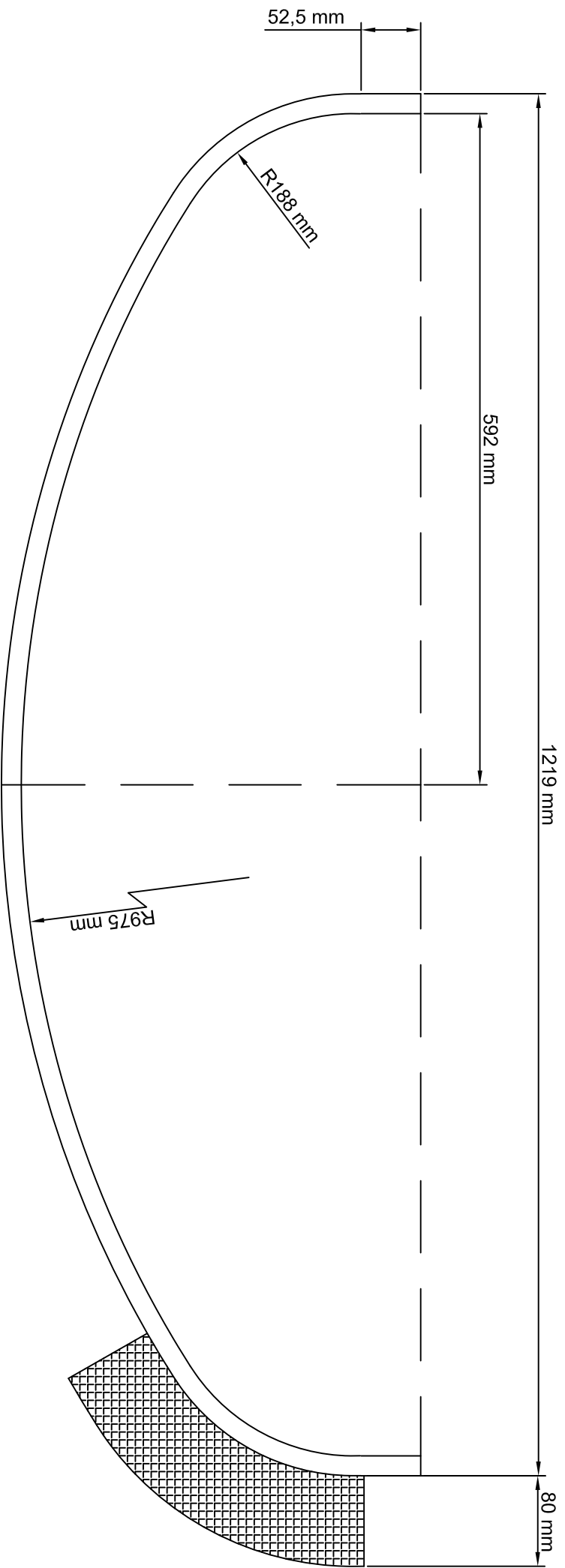
DATOS DE DISEÑO	
CÓDIGO	ASME VIII Dv.1
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	180,2 °C
PRESIÓN DE OPERACIÓN	14,25 bar
TEMPERATURA DE DISEÑO	200,2 °C
PRESIÓN DE DISEÑO	15,68 bar
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm
ESPECIF. MATERIAL DE COLUMNA	SA 285 Gr C

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.		PLANO: DISEÑO PLATO DE AGOTAMIENTO	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla		Universidad de Cádiz	
FECHA: 17 / 12 / 2014		ESCALA: 1 : 10	PLANO n.º: JCRT-005/011
INGENIERO QUÍMICO		Facultad de Ciencias	
		Universidad de Cádiz	
		Facultad de Ciencias	





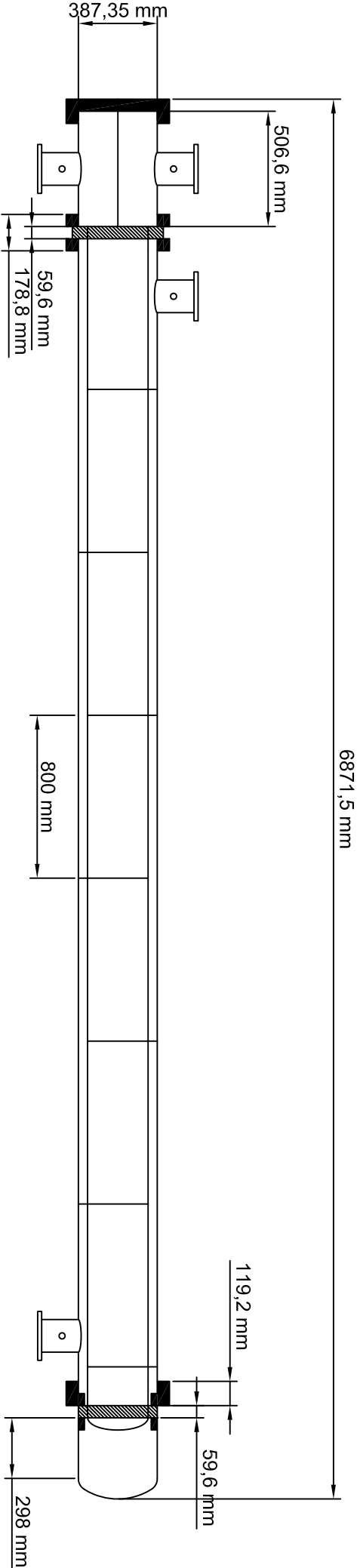
DATOS DE DISEÑO	
CÓDIGO	ASME VIII Dv.1
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	180,2 °C
PRESIÓN DE OPERACIÓN	14,25 bar
TEMPERATURA DE DISEÑO	200,2 °C
PRESIÓN DE DISEÑO	15,68 bar
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm
ESPECIF. MATERIAL DE COLUMNA	SA 285 Gr C
ESPECIF. DE AISLAMIENTO	LANA DE ROCA
ESPECIF. DE AISLAMIENTO	80 mm

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: DISEÑO FONDO SUPERIOR	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torreclilla			Universidad de Cádiz	
FECHA: 17 / 12 / 2014			Facultad de Ciencias	
ESCALA: 1 : 5			INGENIERO QUÍMICO	
PLANO n.º: JCRT-006/011			Universidad de Cádiz	
INGENIERO QUÍMICO			Facultad de Ciencias	

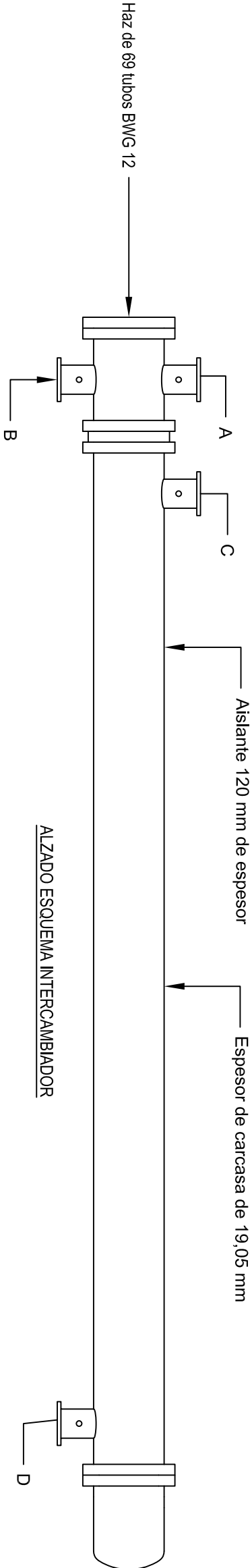


DATOS DE DISEÑO	
CÓDIGO	ASME VIII Dv.1
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	180,2 °C
PRESIÓN DE OPERACIÓN	14,25 bar
TEMPERATURA DE DISEÑO	200,2 °C
PRESIÓN DE DISEÑO	15,68 bar
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm
ESPECIF. MATERIAL DE COLUMNA	SA 285 Gr C
ESPECIF. DE AISLAMIENTO	LANA DE ROCA
ESPECIF. DE AISLAMIENTO	80 mm

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: DISEÑO FONDO INFERIOR	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla			Universidad de Cádiz	Facultad de Ciencias
FECHA: 17 / 12 / 2014	ESCALA: 1 : 5	PLANO n.º: JCRT-007/011	<div><div> UCA Universidad de Cádiz</div><div><div>Biocología Enología Ingeniería Química Matemáticas Química</div><div> Campus de Puerto Real</div></div></div>	
INGENIERO QUÍMICO				



SECCIÓN LONGITUDINAL



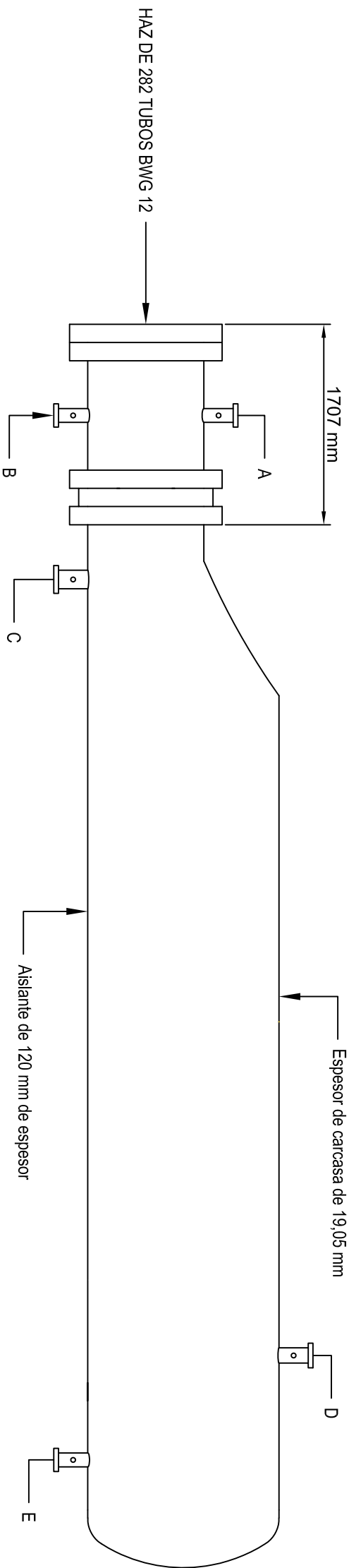
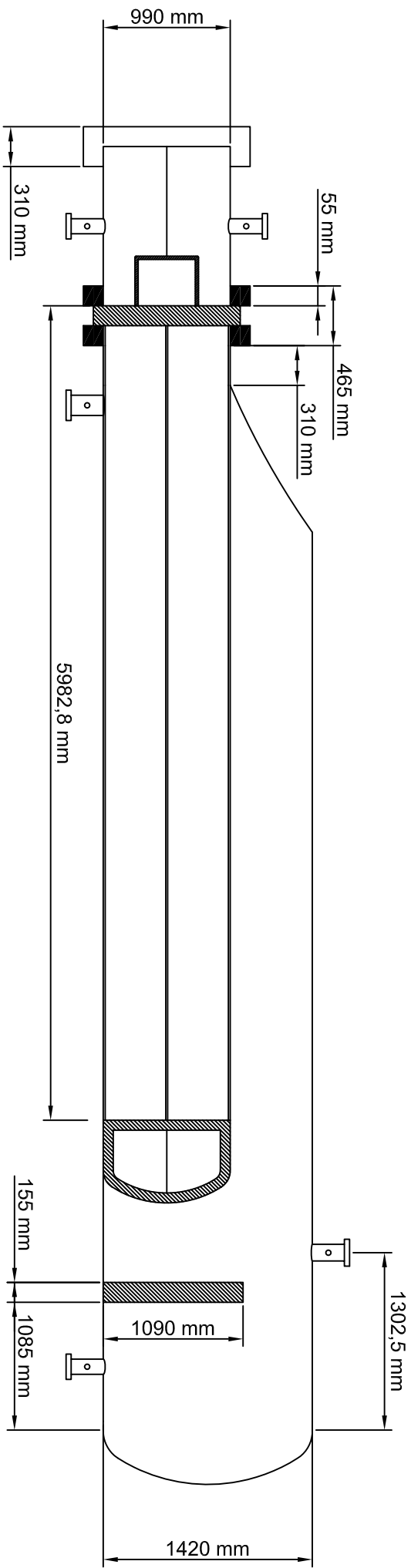
MATERIALES	
CARCASA	SA-285 C
TUBOS	SA-106 B

CORRIENTES	
A	ENTRADA CORRIENTE A CALENTAR
B	SALIDA CORRIENTE A CALENTAR
C	ENTRADA ACEITE TÉRMICO
D	SALIDA ACEITE TÉRMICO

DATOS DE DISEÑO	
CONFIGURACIÓN	TUBOS/CARCASA
CÓDIGO	TEMA
TIPO INTERCAMBIADOR	AES
FLUIDOS	ALIM. COLUM./ACEITE TÉRMICO
TEMPERATURA DE ENTRADA [°C]	20 / 350
TEMPERATURA DE SALIDA [°C]	130 / 325
Nº DE PASOS	2 / 1
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR ICA	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrejilla			Universidad de Cádiz	
FECHA: 17 / 12 / 2014			Facultad de Ciencias	
ESCALA: 1 : 28			INGENIERO QUÍMICO	
PLANO n.º: JCRT-008/011			INGENIERO QUÍMICO	





MATERIALES	
CARCASA	SA-285 C
TUBOS	SA-106 B

CORRIENTES	
A	ENTRADA ACEITE TÉRMICO
B	SALIDA ACEITE TÉRMICO
C	ENTRADA LÍQUIDO A VAPORIZAR
D	SALIDA DEL VAPOR
E	SALIDA DEL CONDENSADO

DATOS DE DISEÑO	
CONFIGURACIÓN	TUBOS/CARCASA
CÓDIGO	TEMA
TIPO INTERCAMBIADOR	AKT
FLUIDOS	ALIM. COLUM./ACEITE TÉRMICO
TEMPERATURA DE ENTRADA [°C]	20 / 350
TEMPERATURA DE SALIDA [°C]	130 / 325
Nº DE PASOS	2 / 1
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm

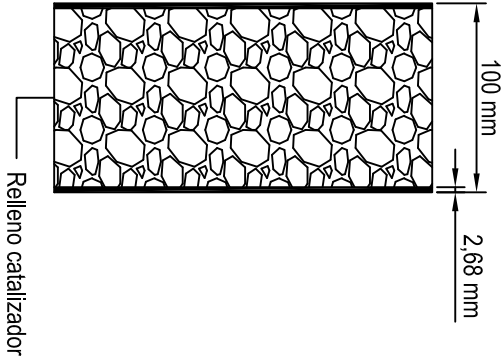
ALZADO ESQUEMA CALDERÍN

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: DISEÑO DE CALDERÍN CV	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla			Universidad de Cádiz	
FECHA: 17 / 12 / 2014			Facultad de Ciencias	
ESCALA: 1 : 45				
PLANO n.º: JCRT-009/011				
INGENIERO QUÍMICO				



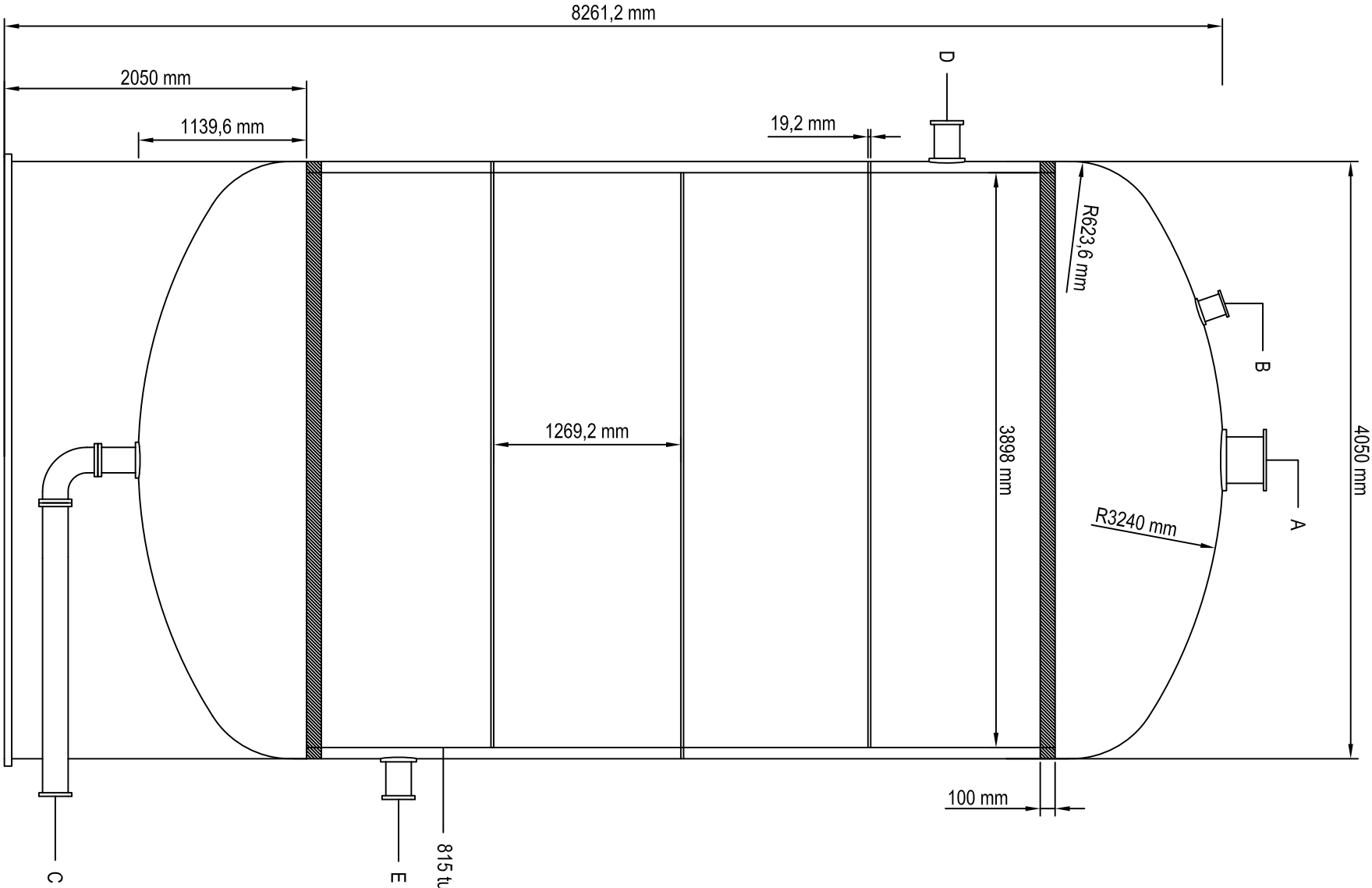
MATERIALES	
CARCASA	SA-285 C
TUBOS	SA-106 B

CORRIENTES	
A	ENTRADA HIDRÓGENO
B	ENTRADA VGO
C	SALIDA PRODUCTOS
D	ENTRADA REFRIGERANTE
E	SALIDA REFRIGERANTE



DETALLE DEL TUBO (X10)

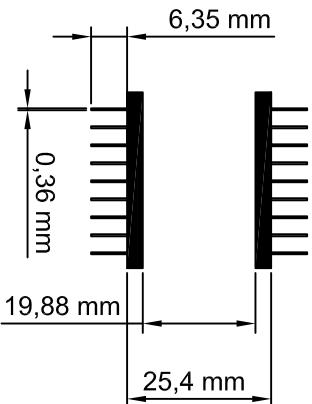
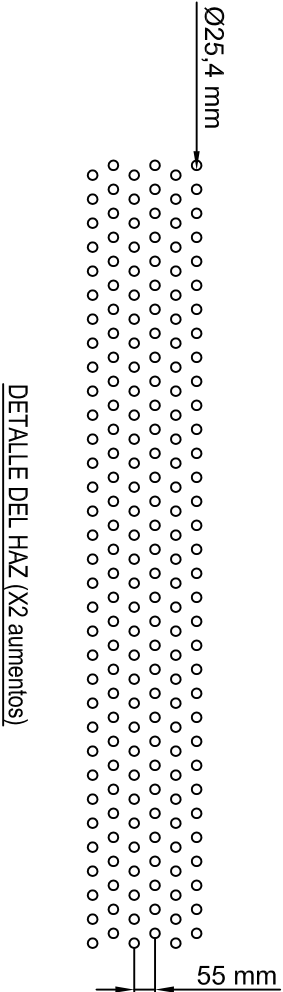
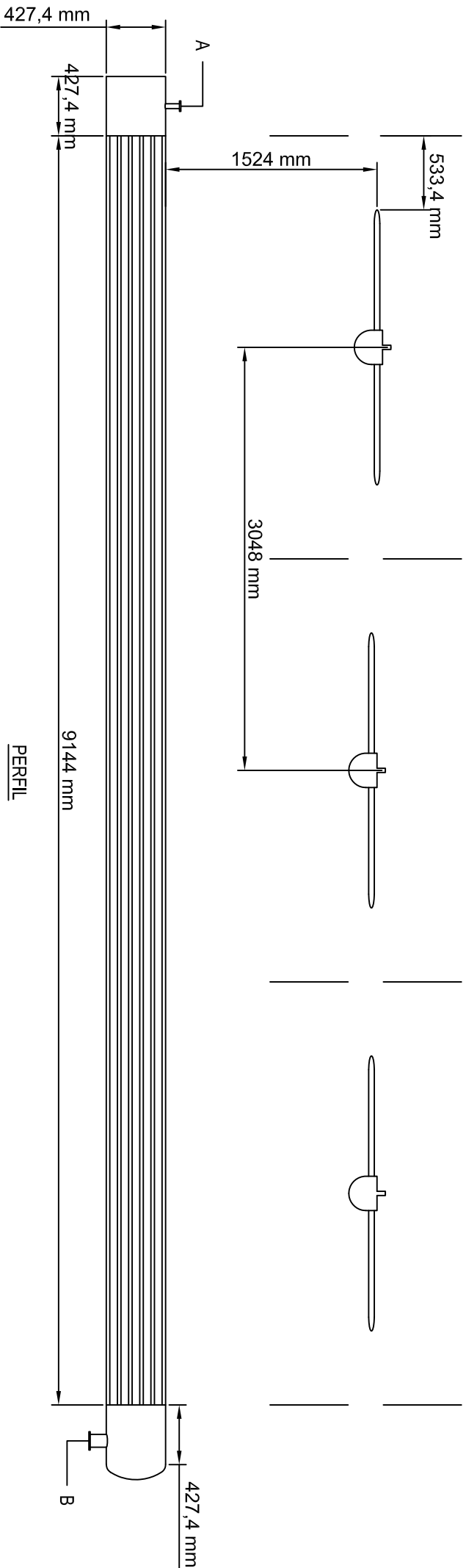
DATOS DE DISEÑO	
CONFIGURACIÓN	TUBOS/CARCASA
CÓDIGO	ASME VIII Div.1
FLUIDOS	REACTIVOS/REFRIGERANTE
TEMPERATURA OPERACIÓN [°C]	320 / 170
PRESIÓN OPERACIÓN [bar]	10 / 8
TEMPERATURA DISEÑO[°C]	340 / 190
PRESIÓN DISEÑO[bar]	11 / 8,8
Nº DE PASOS	1 / 1
MARGEN DE CORROSIÓN	2,5 mm



SECCIÓN LONGITUDINAL

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: DISEÑO DEL SISTEMA DE REACCIÓN	
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla			Universidad de Cádiz	
FECHA: 17 / 12 / 2014			Facultad de Ciencias	
ESCALA: 1 : 40			INGENIERO QUÍMICO	
PLANO n.º: JCRT-010/011				





DATOS DE DISEÑO	
Nº DE HACES	1
Nº TUBOS POR HAZ	156
Nº VENTILADORES	3
POTENCIA DE VENTILADORES	2,7/4 kW
ESPESOR DE LOS TUBOS	12 BWG
PITCH	63,5 mm

CORRIENTES	
A	Entrada
B	Salida

MATERIALES	
TUBOS	SA-285 C
ALETAS	ALUMINIO

PROYECTO: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE UNA CORRIENTE DE VGO PARA SU ACONDICIONAMIENTO PREVIO A UN TRATAMIENTO FCC EN REFINERÍA.			PLANO: DISEÑO DEL AEROREFRIGERANTE AE
AUTOR: Jose Carlos Romero Torrecilla			Universidad de Cádiz
FECHA: 17 / 12 / 2014			Facultad de Ciencias
ESCALA: 1 : 40			
PLANO n.º: JCRT-011/011			
INGENIERO QUÍMICO			



Documento III:

PLIEGO DE

CONDICIONES.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	5
1.1.-Objeto del pliego de condiciones.....	5
1.2.-Objeto del proyecto.	5
1.3.-Emplazamiento.	5
1.4.-Documentos del proyecto que definen las obras.	5
1.5.-Normas, reglamentos y ordenanzas para los materiales y obras.	6
1.5.1. Normas de edificación.....	6
1.5.2. Normas UNE.	7
1.5.3. Normas ISO.....	7
CAPITULO 2. CONDICIONES GENERALES.....	8
2.1. Condiciones generales facultativas.	8
2.1.1. Disposiciones generales.	8
2.1.2. Términos del pliego de condiciones.....	8
2.1.3. Interpretación técnica.	9
2.1.4. Obligaciones y Derechos del contratista.....	9
2.1.5. Facultades en la dirección de obra.....	10
2.1.6. Libro de órdenes.	11
2.1.7. Replanteo.	11
2.1.8. Ejecución de las Obras.....	12
2.1.9. Condiciones generales del suministro de equipos.....	12
2.1.10. Contradicciones entre Pliegos y Normas.	13
2.1.11. Significado de los ensayos.....	13
2.1.12. Puesta a punto y pruebas de funcionamiento.	13
2.1.13. Control de Calidad y Ensayo.....	14
2.1.14. Partidas de alzada	14
2.1.15. Recepción provisional de las Obras.....	14
2.1.16. Periodo de garantías.	15
2.1.17. Recepción definitiva.	16
2.1.18. Documento final de la Obra.	16
2.2. Condiciones Generales Económicas.....	16
2.2.1. Fianzas.....	17
2.2.2. Composición de precios unitarios.	17

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.2.3. Precios contradictorios.....	18
2.2.4. Mejoras y modificaciones.	18
2.2.5. Revisión de Precios.....	18
2.2.6. Valoración, medición y abonos de los trabajos.....	19
2.2.7. Penalizaciones.	20
2.2.8. Seguros y conservación de la Obra.	20
2.2.9. Condiciones de pago.	21
2.3. Condiciones Generales Legales.	21
2.3.1. Disposiciones Legales.	21
2.3.2. Contratista.....	22
2.3.3. Contrato.	22
2.3.4. Adjudicación.....	23
2.3.5. Arbitrajes y Jurisdicción competente.....	24
2.3.6. Responsabilidades del Contratista.....	24
2.3.7. Subcontratas.....	25
2.3.8. Accidentes de trabajo.....	25
2.3.9. Rescisión de Contrato.....	26
CAPITULO 3. CONDICIONES PARTICULARES.....	29
3.1. Disposiciones de Carácter Particular.....	29
3.2. Condiciones de Materiales, Equipos y Maquinaria.	29
3.2.1. Materiales de Construcción.	29
3.2.2. Materiales para la fabricación de equipos.....	30
3.2.3. Equipos.....	34
3.2.4. Maquinaria.	35
3.3. Condiciones de Ejecución.....	35
3.3.1. Movimientos de Tierra.	35
3.3.2. Obras de Saneamiento.....	35
3.3.3. Cimentaciones.....	36
3.3.4. Estructuras metálicas.	36
3.3.5. Albañilería.	36
3.3.6. Cerrajería y Carpintería.	36
3.3.7. Cubierta de edificios.....	36
3.3.8. Fontanería.	36
3.3.9. Instalaciones eléctricas.	36

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.3.10. Calefacción y Ventilación. 37

3.3.11. Instalaciones de Protección contra Incendios..... 37

3.3.12. Pinturas y vidrieras..... 37

3.3.13. Otras instalaciones no específicas..... 37

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1.1.-Objeto del pliego de condiciones.

El presente pliego tiene por objeto la ordenación, con carácter general, de las condiciones facultativas y económicas que han de regir en los concursos y contratos destinados a la ejecución de los trabajos de obra civil, siempre que expresamente se haga mención de este pliego en los particulares de cada una de las obras.

En este último supuesto, se entiende en Contratista Adjudicatario de la obra se compromete a aceptar íntegramente todas y cada una de las cláusulas del presente Pliego General, a excepción de aquellas que expresamente queden anuladas o modificadas en el Pliego Particular de Condiciones de cada una de las obras.

1.2.-Objeto del proyecto.

El objeto principal del presente Proyecto Fin de Carrera es diseñar una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de gasóleo pesado (VGO) para su acondicionamiento previo a un tratamiento de craqueo catalítico fluidizado (FCC) en refinería.

Se pretende tratar una cantidad de VGO de 22000 bbl/día.

1.3.-Emplazamiento.

El presente Proyecto se ha diseñado con objeto de poder ser instalado en cualquier refinería que así lo requiera, por lo que no le daremos un emplazamiento concreto, sino aquel que se requiera en la obra de construcción pertinente.

1.4.-Documentos del proyecto que definen las obras.

Los documentos que definen las obras y que la propiedad entrega al contratista pueden ser de carácter contractual o meramente informativo. Se entiende por documentos contractuales aquellos que estén incorporados en el contrato y que sean de obligado cumplimiento, excepto modificaciones debidamente autorizadas.

El presente Proyecto consta de los siguientes documentos:

- Documento nº1: Memoria.
- Documento nº2: Planos.
- Documento nº3: Pliego de Condiciones.
- Documento nº4: Presupuesto.

Son documentos contractuales los Planos, el Pliego de Condiciones y el Presupuesto recogidos en el presente proyecto. Los datos incluidos en la Memoria y Anexos, tienen carácter meramente informativo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.5.-Normas, reglamentos y ordenanzas para los materiales y obras.

El Pliego de Condiciones prevalecerá sobre el contenido de las siguientes disposiciones. Las disposiciones de carácter particular de ámbito técnico son:

✓ Real Decreto 919/2006, 28 de Julio, por el que se aprueba el Reglamento Técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias IDG 01 A 11. Orden FOM/891/2004, de 1 de Marzo, por la que se actualizan determinados artículos de Pliego de Prescripciones Técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos.

✓ Real Decreto 1797/2003, de 26 de Diciembre, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-03).

✓ Orden FOM/475/2002, de 13 de Febrero por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para obra de carreteras y puentes relativos a hormigones y aceros.

✓ Real Decreto 2267/2004, de 3 de Diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

✓ Real Decreto 315/2006, de 17 de Marzo (Ref. 2006/5516), sobre la creación del Consejo sobre la Sostenibilidad, Innovación y Calidad de Edificación.

✓ Real Decreto, de 10 de Marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

✓ Ley 6/ 2001, 8 de Mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de Junio, de Evaluación del Impacto Ambiental.

✓ Real Decreto 1124/2000, de 16 de Junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de Mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E. núm. 145 de 17 de Junio de 2000).

✓ Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro. BOE núm. 302 de 19 de diciembre.

1.5.1. Normas de edificación.

✓ Normas básicas de edificación (NBE).

✓ Normas tecnológicas de Edificación (NTE).

— Relativas a cimentaciones.

— Relativas a estructuras de acero (EA).

— Relativas a instalaciones de electricidad de puesta a tierra (JET).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- Relativas a instalaciones de electricidad de red exterior (IR).
 - Relativas a instalaciones de electricidad de transformadores (IET).
 - Relativas a instalaciones de fontanería de abastecimiento (IFA).
 - Relativas a instalaciones de salubridad de alcantarillado (ISA).
 - Relativas a instalaciones de salubridad de humos y gases (ISH).
 - Relativas a instalaciones de salubridad de depuración y vertidos (ISD).
- ✓ Reglamento del agua.
 - ✓ Instrucciones EH-91 y EP-80 para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.
 - ✓ Instrucciones para la fabricación y suministro de hormigón preparado (EHPRE-72). (OM del 10 de Mayo de 1973).
 - ✓ Reglamento sobre recipientes y aparatos a presión, aprobado por el Decreto 1244/1979 de 4 de abril.
 - ✓ Pliego de prescripciones técnicas generales para la recepción de cementos (RC- 93).
 - ✓ Normas I.N.T.A. (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial “Esteban Terradas”) de la comisión 17 sobre pinturas, barnices, etc.
 - ✓ Reglamento de la Línea Eléctrica de Alta tensión. Decreto 3151/68, de 28 de noviembre.

1.5.2. Normas UNE.

Normas UNE (Normativa de la Asociación española de Normalización) que pueden afectar a los materiales, equipos y unidades de obra incluidos en el Proyecto.

1.5.3. Normas ISO.

Normas ISO (Organización Internacional de Normalización) que pueden afectar a los materiales, equipos y unidades de obra incluidos en el Proyecto.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPITULO 2. CONDICIONES GENERALES.

2.1. Condiciones generales facultativas.

2.1.1. Disposiciones generales.

Se establecen las siguientes disposiciones generales:

- ✓ Reglamento de contratación de competencias locales.
- ✓ Ley, Reglamento y Pliego de contrataciones del Estado.
- ✓ Pliego de Cláusulas económico-administrativas particulares.
- ✓ Ley de contrato de trabajo y disposiciones vigentes que regulan las relaciones patrón-obrero.
- ✓ Ordenanza Laboral de Seguridad e Higiene en el trabajo, así como cualquier otra que con carácter general se dicte.
- ✓ En caso de contradicción entre estas disposiciones y el presente Pliego prevalecerá lo contenido en éste.

2.1.2. Términos del pliego de condiciones

El significado de los términos desarrollados en el presente Pliego es el siguiente:

•**Propiedad:** Los derechos de este Proyecto pertenecen a la Refinería que adquiera los derechos del mismo en caso de desear la instalación de la línea de proceso proyectada. Un ejemplo podría ser el grupo Cepsa situada en el Polígono Industrial de San Roque en el campo de Gibraltar en la provincia de Cádiz.

•**Dirección de Obra:** Está constituida por el Titulado Superior y Titulado Medio que designa la propiedad en su momento. Tiene la misión de representar a la Propiedad, defender sus intereses y establecer las relaciones contractuales con el Contratista adjudicatario de la obra del Proyecto. Se encarga de que la obra sea una reproducción fidedigna de lo proyectado y estipulado en este Pliego, así como con su intervención se garantiza la inspección de materiales, el estado de los equipos, el perfecto funcionamiento y el apoyo técnico al Contratista.

•**Contratista:** Entidad fiscal que contrata con la Propiedad la ejecución material de toda la obra o una parte de ella. Cuando en el Pliego se refiere al Contratista, se refiere al Contratista general de la obra y no a las subcontratas que este haya podido a su vez realizar. No podrá hacer uso de la documentación del Proyecto para cualquier otro fin diferente al desarrollo del mismo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.1.3. Interpretación técnica.

Corresponde exclusivamente a la Dirección Técnica, la interpretación del Proyecto y la consiguiente expedición de órdenes complementarias, gráficas o escritos para el desarrollo del mismo.

La Dirección Técnica podrá ordenar, antes de la ejecución de las obras, las modificaciones de detalle del Proyecto que crea oportunas siempre que no altere las líneas generales del de éste, no excedan la garantía técnica y sean razonablemente aconsejadas por eventualidades surgidas durante la ejecución de los trabajos o por mejoras que crea conveniente introducir. Corresponde también a la Dirección Técnica apreciar las circunstancias en las que, a instancias del Contratista, pueda proponerse la sustitución de materiales de difícil adquisición por otros de características similares, aunque de distinta calidad o naturaleza y fijar la alteración de precios que en tal caso sea razonable.

Las condiciones técnicas que figuran en este Pliego de Condiciones obligan igualmente en las obras que se realizan por contrata y las que pudieran decidir la Propiedad durante el régimen de administración. El Contratista no podrá alterar ninguna parte del Proyecto ni podrá hacer uso de los Planos y datos para distintos fines de los de esta obra.

2.1.4. Obligaciones y Derechos del contratista.

La Propiedad entregará al Contratista, libre de todo gasto, tres copias de todos los planos necesarios para la ejecución del trabajo. En caso de que el Contratista necesitara más copias, la Propiedad se las entregará cargándole su coste.

Se considerará que el Contratista ha comprobado el lugar de construcción y, si hubiera lugar, los planos, especificaciones y listas antes de presentar su oferta, y que ha quedado conforme con las condiciones en que habrá que ejecutarse el trabajo, inclusive en lo referente al alcance, índole o naturaleza del mismo, posibles obstrucciones y cualquier otra condición de una u otra forma pueda influir en el mismo.

El Contratista deberá conocer las disposiciones laborales, o de otra índole vigente, que pueden ser de aplicación en la realización del trabajo; la disponibilidad de mano de obra local, la disponibilidad de materiales, las condiciones locales de transporte y alojamiento del personal. No se admitirá ninguna reclamación del mismo por no haber hecho anteriormente dicha comprobación. El Contratista proporcionará un número suficiente de operarios competentes y el personal supervisor y administrativo necesario a fin de cumplir con el programa de construcción.

Durante todo el periodo de ejecución del trabajo, el Contratista destacará en la obra un jefe de obra competente y tantos ayudantes como sean necesarios para controlar o supervisar a todo su personal y administrar adecuadamente el contrato.

El jefe de obra representará al Contratista y todas las instrucciones relativas a la realización del trabajo dadas a aquel por escrito obligarán al Contratista tanto como si se hubiesen dado a él directamente. El Contratista no podrá cambiar su jefe de obra si no es bajo previa autorización por escrito de la Propiedad.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El jefe de obra será plenamente responsable de la dirección y organización del trabajo, como también del manejo y control del personal del Contratista empleado para la ejecución de la obra, debiendo conocer detalladamente las condiciones y términos del contrato.

El jefe de obra cuidará de que su personal circule por la línea de proceso, si esto fuese necesario, según itinerarios marcados por la Propiedad, no pudiendo seguir otros caminos, ni entrar en unidades ajenas al trabajo, estén operativas o no.

El Contratista debe cumplir todas las reglamentaciones y órdenes, aplicables a las prácticas de salarios y empleos y en proceder de acuerdo con la política de la Propiedad en los asuntos que afecten a las prácticas locales.

El Contratista mantendrá en condiciones adecuadas las facilidades temporales relativas a los servicios higiénicos y de resguardo de sus empleados.

El Contratista proporcionará, de forma continuada en el sitio de la obra durante la construcción, servicios apropiados de reconocimiento y primeros auxilios. También se tomarán las precauciones necesarias para una rápida asistencia médica en el lugar más cercano que proporcione dichos servicios. El incumplimiento por parte de un empleado de la empresa Contratista de las reglas y prácticas requeridas por la Propiedad será justificada suficientemente para su despido.

Los empleados del Contratista deben estar sujetos a identificación y provistos de los documentos aceptados por la Propiedad para este efecto. El Contratista mantendrá en el sitio de la obra un expediente individual de cada persona que regularmente se emplee en la construcción de la obra. Todos los empleados que visiten la planta deben seguir las instrucciones relativas a seguridad e identificación, tal como si estuvieran regularmente empleados en el sitio de la obra. Cualquiera de los oficiales de seguridad puede, en cualquier momento, solicitar la identificación apropiada y/o el de empleo de cualquier persona.

La propiedad notificará al Contratista la reglamentación que afecte a visitas, accesos, entrada de automóviles en el recinto de la obra, pases especiales y zonas prohibidas de la línea de proceso.

2.1.5. Facultades en la dirección de obra.

La Dirección de Obra es la única capacitada para la interpretación del Proyecto y para la proposición de órdenes complementarias que faciliten la ejecución del mismo.

La Dirección de Obra podrá ordenar, antes de la ejecución de las obras, las modificaciones de detalle del Proyecto que crea oportunas siempre que no altere las líneas generales de éste, no exceda la garantía técnica y sean razonables aconsejadas por eventualidades surgidas durante la ejecución de los trabajos o por mejoras que crea conveniente introducir.

Todas las alteraciones técnicas o presupuestarias derivadas de estas posibles modificaciones serán aceptadas por el Contratista. Cualquier modificación del Proyecto propuesta por el Contratista deberá ser previamente aprobada por la Dirección de Obra, que la evaluará antes de su aprobación o desaprobación, aceptando el primero la resolución adoptada.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Los materiales necesarios para la ejecución de las obras serán suministrados en su totalidad por el Contratista y deberán ser reconocidos antes de su puesta en obra por la Dirección de Obra, sin cuya aprobación no podrán utilizarse en la misma; a tales efectos el Contratista someterá al examen de la Dirección de Obra, al menos dos muestras del material que se trate, reservándose éste el derecho a desechar aquellos que no reúnan las condiciones que, a su juicio, deba reunir el material a utilizar. Los materiales rechazados serán retirados en el plazo más breve. Las muestras de los materiales que hayan sido aceptados serán conservadas juntamente con los certificados de los análisis y ensayos a efectos de posteriores comparaciones y contrastes.

Si en criterio de la Dirección de Obra, alguna unidad de obra estuviera defectuosamente ejecutada, el Contratista estará obligado a demolerla y a ejecutarla nuevamente cuantas veces sean necesarias hasta que merezca la conformidad de la Dirección de Obra; estos aumentos de trabajo no le concederán derecho a percibir indemnización alguna, y ello aún en el caso que las condiciones de mala ejecución de las obras se hubieren detectado con posterioridad a la recepción provisional. Tampoco el supuesto de mala ejecución podrá repercutir en los plazos parciales o en el total de la ejecución de la obra.

2.1.6. Libro de órdenes.

Con objeto de que en todo momento se pueda tener un conocimiento exacto de la ejecución e incidencias de la obra, existirá en ella, en todo momento mientras dure su ejecución, el libro de órdenes, en el que se reflejarán las visitas realizadas por la Dirección de la Obra, las incidencias surgidas y en general todos aquellos datos que sirvan para determinar con certeza si el Contratista ha cumplido los plazos y fases de ejecución previstas para la realización del proyecto. Las anotaciones en el libro de órdenes darán fe a efectos de determinar eventuales causas de resolución y demás incidencias del contrato. Cuando el Contratista no estuviese conforme, podrá alegar en su defensa todas aquellas razones y circunstancias que avalen su postura, aportando las pruebas que estime pertinentes.

2.1.7. Replanteo.

La Dirección de Obra procederá al replanteo de las obras en presencia el Contratista, marcando convenientemente sobre el terreno todos los puntos de referencia necesarios para su ejecución. De esta operación se extenderá un acta, por triplicado, o diligencia en el libro de órdenes, que deberá ser suscrita por la Dirección de Obra, y por la contrata, dejando constancia de la buena realización del replanteo y su concordancia con el terreno, o por el contrario, variarlo si es preciso y redactar un Proyecto reformado. En el primer caso, podrán iniciarse las obras, mientras que en el segundo se dará conocimiento a la Propiedad. Ésta, tomará la resolución que proceda y se la comunicará al Contratista, al objeto de la prórroga del plazo y de la posibilidad de rescisión del contrato. El Contratista facilitará todos los medios precisos para la materialización de los replanteos, que serán a su cargo, asumiendo la responsabilidad del mantenimiento de las señales o datos que se fijen sobre el terreno para su cálculo.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.1.8. Ejecución de las Obras.

El Contratista dará comienzo a las obras dentro de los siete días siguientes a la formalización del contrato, salvo que dicha fecha quedara expresamente determinada en el mismo. La fecha de comienzo así fijada contará a efectos de plazos de ejecución y de revisión de precios en el supuesto de que tal revisión se hubiese pactado.

Junto a su oferta económica, el Contratista presentará un calendario de los trabajos a ejecutar en el que se precisará el tiempo necesario para ejecutar la totalidad de la obra y de cada una de sus correspondientes partes.

El plazo en el que el Contratista se compromete a ejecutar las obras objeto de este proyecto quedará fijado en el contrato y su incumplimiento se entenderá como una rescisión unilateral e injustificada del mismo. A efectos del cómputo de ejecución, la Dirección de Obra extenderá en el libro de órdenes diligencia haciendo constar el día en que se inician los trabajos, conforme a lo señalado en el artículo precedente.

Deberían descontarse en dichos plazos los días de parada debidos a fuerza mayor que impidan el normal desarrollo de los trabajos siempre que así lo estime conveniente la Dirección de Obra.

Siempre que cualquier parte de la obra se complete, quedando lista para operar la Propiedad puede tomar posesión de tal servicio para su utilización. Sin embargo, la posesión u operación de cualquier parte determinada de la obra no constituirá necesariamente una aceptación por parte de la Propiedad. El Contratista estará obligado a completar las partes no terminadas de dichos servicios, haciéndose responsable de errores u omisiones descubiertas después de la utilización por parte de la Propiedad, tal como si el citado servicio no hubiese sido puesto en operación.

El Contratista deberá someter a la aprobación de la Dirección Técnica antes del comienzo de las obras un programa con especificaciones de plazos parciales y fechas de terminación de las distintas unidades de obra, compatibles con el plazo total de ejecución.

Este plan, una vez aprobado por la Propiedad, se incorporará al Pliego de Condiciones y adquirirá, por tanto, carácter contractual. La aceptación del plan de obra no implica exención alguna de responsabilidades para el Contratista en caso de incumplimiento de los plazos parciales o totales convenidos.

2.1.9. Condiciones generales del suministro de equipos.

Los equipos se ajustarán a las condiciones especificadas desarrolladas para cada uno de ellos en sus correspondientes Hojas de Especificaciones, siendo los materiales a utilizar en la fabricación del equipo aprobados por la Dirección Técnica. Los diseños de detalle referentes al equipo en el transcurso de la obra, serán desarrollados por el Contratista, y deben ser aprobados por la Dirección técnica previamente al suministro.

Los materiales utilizados en la fabricación del equipo deben estar aprobados y definidos por la Dirección técnica, especialmente aquellos que estén en contacto con el material a inspeccionar.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

La adquisición de los equipos deberá ser documentada por el Contratista tras la instalación del equipo y el perfecto funcionamiento de éste. La entrega quedará documentada mediante un informe de recepción firmado por el Contratista y por la Dirección Técnica.

Si durante la instalación o recepción del equipo se define algún detalle sobre las capacidades del equipo que no estaba definida en el Proyecto, deberá ser estudiada por el Contratista y la Dirección Técnica, debiendo introducirse en el Proyecto final las conclusiones de este estudio y los costes originados cubiertos por la Propiedad.

2.1.10. Contradicciones entre Pliegos y Normas.

El presente Pliego de Condiciones ha sido redactado de acuerdo con las disposiciones oficiales vigentes. En casos excepcionales se justifican posibles discrepancias, prevaleciendo lo incluido en el Pliego sobre cualquier otra disposición.

Las omisiones en planos y Pliego de Condiciones o las descripciones erróneas de los detalles de la obra que deben ser subsanados, para que pueda llevarse a cabo en espíritu o intención expuesto en los planos y el Pliego de Condiciones o que, por uso y costumbres, deben ser realizados, no solo no exima al Contratista de la obligación de ejecutar estos detalles u obra omitidos erróneamente sino que por el contrario, deberán ser ejecutados como si se hubiera completado y correctamente especificados en los planos y Pliego de Condiciones.

2.1.11. Significado de los ensayos.

Los ensayos durante la ejecución de la obra son meros antecedentes de la recepción. Estos ensayos no liberan al Contratista para subsanar, reponer o reparar los equipos e instalaciones que no pasen el reconocimiento final.

El Contratista estará obligado a facilitar a la Dirección Técnica la labor de realización de ensayos e inspecciones.

Independientemente de la Dirección Técnica de las obras, la propiedad podrá inspeccionar en cualquier momento la buena marcha de las obras, así como la adecuación de las mismas a las estipulaciones del contrato y adoptar cuantas decisiones considere procedentes en garantía de su correcta ejecución.

2.1.12. Puesta a punto y pruebas de funcionamiento.

Aquellos elementos de la instalación que, por naturaleza y forma de sus condiciones, no tienen necesidad de poner en servicio al conjunto de la instalación serán objeto de prueba tan pronto como se hayan acabado.

Antes de verificar la recepción provisional, se someterán las obras a pruebas de resistencia, estabilidad e impermeabilidad. De igual modo el Contratista procederá a la puesta a punto de la instalación, verificándose pruebas generales de su funcionamiento y efectividad de tratamiento.

Diseño de una unidad de hidrosulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Estas pruebas se efectuarán a pleno caudal de la instalación o de la parte de la misma a la que afecte la prueba. Se comprobará el buen comportamiento en la totalidad de las instalaciones y mecanismos de la instalación.

2.1.13. Control de Calidad y Ensayo.

Cuando lo estime oportuno la Dirección de Obra ordenará realizar las pruebas y ensayos, análisis y extracción de muestras, que sean necesarias para comprobar que las unidades de obra y sus materiales componentes están en las condiciones exigibles y cumplen con lo establecido en este Pliego. Las pruebas y ensayos se harán bajo su inspección.

El Contratista deberá, por su cuenta, suministrar a los laboratorios de control de calidad homologados una cantidad suficiente de material a ensayar, y abonar todos los gastos que estas pruebas generen.

Ninguna parte de la obra será enterrada de manera que sea inaccesible sin que previamente haya sido inspeccionada y aceptada por la Propiedad. El Contratista corregirá, a su costa, cualquier obra que a su juicio de la representación de la Propiedad no haya superado la inspección o pruebas.

La Propiedad podrá ordenar la discusión, y en este caso el Contratista estará obligado a dejar al descubierto dicha parte de la obra. Si se comprueba que tal trabajo está ejecutando de acuerdo con los documentos del contrato, la Propiedad abonará el costo de las inspecciones y el de la restitución de la obra al estado en que se encontraba. En el caso que se compruebe que tal trabajo no está de acuerdo con los documentos del contrato, el Contratista pagará tales gastos.

2.1.14. Partidas de alzada

Para la ejecución material de las partidas alzadas deberá obtenerse la previa aprobación de la Dirección de Obra. A tal efecto, antes de proceder a la ejecución, se someterá a su consideración el detalle desglosando del importe de las mismas y si resultase conforme podrán realizarse.

2.1.15. Recepción provisional de las Obras.

Terminado el periodo de la prueba de funcionamiento con resultado satisfactorio se procederá a la recepción provisional de la forma que dispone de la legislación vigente. Para ello deberán haberse cumplido las condiciones siguientes:

- ✓ Resultado satisfactorio de las pruebas realizadas.
- ✓ Cumplimiento de todas las obligaciones contenidas en el contrato o en acuerdos posteriores.

En el acto de recepción estarán presentes: la persona en quien delegue la Entidad Promotora de las obras, la Dirección de Obra de las mismas y el Contratista, levantándose acta del mismo. El Acta de Recepción contendrá necesariamente los siguientes documentos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- ✓ Relación de problemas de funcionamiento pendientes de resolver si diera el caso.
- ✓ Relación de los puntos que deben ser estudiados o vigilados especialmente durante el periodo de garantía.
- ✓ Protocolo de las pruebas de rendimiento y funcionamiento a realizar durante el periodo de garantía.

En el caso de que las obras no se hallaran en estado de ser recibidas, se hará constar así en el acta, con medición de las circunstancias o defectos que lo impidan, dándose las instrucciones precisas y detalladas por la Dirección de Obra al Contratista a efectos de subsanar los defectos observados, fijándose plazo para efectuarlo, a cuyo vencimiento se realizará una nueva inspección para la recepción provisional de las obras. Si el Contratista no subsanase los defectos encontrados se producirá la rescisión del contrato, con pérdida de las retenciones practicadas a no ser que la Propiedad juzgue oportuno conceder un nuevo e improrrogable plazo.

El plazo de garantía comenzará a contarse a partir de la fecha de la recepción provisional positiva de la obra.

En la recepción provisional, el Contratista deberá presentar las autorizaciones de los organismos oficiales para el uso y puesta en servicio de las instalaciones que así lo requieran, no se realizará la recepción provisional ni, como es lógico la definitiva, si no se cumple este requisito.

2.1.16. Periodo de garantías.

El Contratista garantiza en general todas las obras que ejecute, así como los materiales empleados en ellas y su correcta manipulación.

El plazo de garantía será de doce meses, a no ser que se especifique otro periodo en el Proyecto de detalle, durante el cual el Contratista corregirá los defectos observados, eliminará y volverá a ejecutar las obras rechazadas y reparará los desperfectos que se produzcan, todo ello a su cargo y sin derecho de indemnización alguna.

En caso de que el Contratista no cumpliera con esta obligación, las reparaciones serán ejecutadas por la Propiedad con cargo a las retenciones.

Junto con la recepción final de los equipos se entregará una lista de repuestos, precio y lugares de adquisición recomendados de los mismos. El Contratista podrá contratar con la Propiedad un contrato de mantenimiento preventivo o de asistencia en caso de avería, que cubra el periodo de garantía y el tiempo posterior a éste.

Para poder decidir sobre las cuentas pendientes de resolver o que surjan durante el periodo de garantía o en la ejecución de pruebas, incluyendo naturalmente las reparaciones, modificaciones o sustituciones que se presenten, el Contratista queda obligado a mantener un representante con capacidad y obligación de firmar las actas que se vayan levantando.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El Contratista garantiza a la Propiedad contra toda reclamación de terceras personas que tuvieran su origen en el incumplimiento de sus obligaciones económicas o de las disposiciones legales relacionadas con la obra. Una vez aprobada la recepción y liquidación definitiva, la Propiedad devolverá, en su caso, las cantidades retenidas al Contratista en las certificaciones.

2.1.17. Recepción definitiva.

Dentro del mes siguiente al cumplimiento del plazo de garantía, se procederá a la recepción definitiva de las obras.

Si las obras se encontrasen en las condiciones debidas, se procederá a su recepción definitiva, de la que se levantará acta, en virtud de lo cual el Contratista quedará relevado de toda responsabilidad.

El Acta de Recepción Definitiva de las obras se efectuará después de terminado el periodo de garantía en la forma que dispone la legislación vigente. En dicho acta deberán quedar resueltas todas las cuestiones que en el Acta de Recepción Provisional quedaron pendientes del funcionamiento durante el periodo de garantía.

2.1.18. Documento final de la Obra.

El Contratista entregará a la Dirección de Obra, antes de la Recepción definitiva, tres ejemplares del documento elaborado como final de obra. Dicho documento deberá recoger todas las incidencias acaecidas en la obra desde su inicio hasta su finalización, así como aquellas modificaciones que durante el transcurso de la misma hayan tenido lugar. Del mismo modo, quedarán perfectamente reflejadas, mediante la documentación gráfica correspondiente, la ubicación final de todas las instalaciones para que, de este modo se facilite cualquier trabajo de reparación o modificación que resulte necesario llevar a cabo con posterioridad.

2.2. Condiciones Generales Económicas.

Todas las unidades de obra se medirán y abonarán por su volumen, superficie, longitud y peso. Si el Contratista construye mayor volumen del que corresponde en los dibujos que figuran en los planos o en sus reformas autorizadas, no se abonará este exceso, pero si este resultara perjudicial, a juicio de la Dirección Técnica, se verá obligado a demolerlo de forma gratuita y a rehacerlo con las dimensiones debidas.

Serán de cuenta del Contratista las obras auxiliares que para la realización de los trabajos sean necesarios o que la Dirección de Obra estime imprescindibles, y no tendrá derecho a retribución especial, considerándose incluidos estos gastos en los precios de la obra.

Serán también de cuenta del Contratista los útiles y herramientas necesarios para la ejecución de las obras, y los medios auxiliares reunirán las condiciones de seguridad indispensables para el personal, siendo el Contratista directamente el responsable de los accidentes o desperfectos que se pudiera ocasionar.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Las mejoras de obra que voluntariamente efectúe el Contratista en atención a una calidad superior a la exigida en el Proyecto, o cualquier modificación que el mismo introdujera sin la conformidad de la Dirección de Obra por escrito, no serán abonadas. En ningún caso el Contratista tendrá derecho a reclamación por motivos de insuficiencia de precio o falta de explicación.

2.2.1. Fianzas.

El Contratista prestará fianza que se corresponderá con un depósito previo, en metálico o valores, o aval bancario, por importe del 5% del precio total de contrata.

La fianza retenida será devuelta al Contratista en un plazo que no excederá de treinta días, una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva de la obra, siempre y cuando no existan penalizaciones de algún tipo por incumplimiento de algún apartado del contrato, en cuyo caso se descontará de la fianza el valor de los mismos devolviendo el resto al Contratista en ese mismo plazo. La Propiedad podrá exigir que el Contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros, subcontratos, etc.

2.2.2. Composición de precios unitarios.

Todos los precios unitarios se entienden valorados para cada partida totalmente terminada y, en el caso de equipos y maquinaria funcionando, están comprendidos en ella la parte proporcional de costes de puesta a punto, permisos, boletines, licencias, tasas, suministros para pruebas, etc.

El cálculo de los precios de las distintas unidades de obra es el resultado de sumar las siguientes partidas:

- ✓ Materiales, expresando las cantidades que en cada unidad de obra se precisen de cada uno de ellos y su precio unitario respectivo de origen.
- ✓ Mano de obra por categorías dentro de cada oficio, expresando el número de horas invertidas por cada operario en la ejecución de cada unidad de obra y los jornales horarios correspondientes.
- ✓ Transporte de materiales, desde el punto de origen al pie de la obra, expresando el precio del transporte de unidades.
- ✓ Tanto por ciento de medios auxiliares y de seguridad sobre la suma de conceptos anteriores en las unidades de obra que se precisen.
- ✓ Tanto por ciento de seguros sociales y cargas vigentes sobre el costo de la mano de obra, especificando en documento aparte, la cuantía de cada concepto del seguro o carga.
- ✓ Tanto por ciento de gastos generales, sobre la suma de conceptos anteriores.
- ✓ Tanto por ciento de beneficio industrial del contratista, aplicando a la suma total de los conceptos anteriores.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Se denominará Precio de Ejecución Material (P.E.M.) al resultado obtenido por la suma de los anteriores conceptos, a excepción del beneficio industrial.

La suma de todas las cantidades que importan las siete partidas se entiende que es el precio unitario contratado (Precio de Ejecución por Contrata).

Todas las partidas que intervienen en el presupuesto tendrán su precio unitario descompuesto descrito de forma completa, de manera que queden precisadas y determinada cualitativa y cuantitativamente todas las características técnicas importantes de cada unidad a ejecutar (también sus prestaciones en el caso de equipos), y su precio final estará escrito en letras, expresado en euros con dos decimales.

2.2.3. Precios contradictorios.

Si ocurriese algún caso excepcional e imprevisto en el que fuese necesaria la determinación de precios contradictorios entre la Propiedad y el Contratista, estos precios deberán aprobarse por la Propiedad a la vista de la propuesta de la Dirección de Obra y de las observaciones del Contratista.

Si éste no aceptase los precios aprobados quedará exonerado de ejecutar las nuevas unidades.

Las unidades de obra con PC, se introducirán al final de las partidas existentes en cada capítulo, definiéndose expresamente con dichas siglas y que van aprobadas por la Administración, se entenderán incorporados a todos los efectos, a los cuadros de precios de proyecto base del contrato.

2.2.4. Mejoras y modificaciones.

Cualquier modificación en las unidades de obra que suponga la realización de distinto número de aquellas, en más o menos de las figuradas en el estado de mediciones y presupuesto, deberá ser conocida y aprobada previamente a su ejecución por la Dirección de Obra, haciéndose constar en el libro de órdenes tanto la autorización como la comprobación posterior de su ejecución.

En caso de no obtener esa autorización, el Contratista no tendrá derecho bajo ningún concepto al abono de las unidades de obra que hubiese ejecutado de más respecto a las figuradas en el proyecto.

2.2.5. Revisión de Precios.

Para poder en un momento dado discernir con la mayor aproximación acerca de las posibles revisiones de precios que puedan presentarse durante la obras como consecuencia de un aumento oficial autorizado, o en el caso de una posible rescisión del contrato, los contratistas de los distintos gremios presentarán juntamente con su presupuesto de unidades de obra otra hoja firmada con los siguientes datos:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

✓ Porcentaje de mano de obra, de materias, de gastos generales y de beneficio industrial que suponen estos conceptos con relación al importe total del presupuesto de contrata de cada gremio.

✓ Los precios de las distintas unidades y su descomposición con el fin de aclarar más aún cualquier duda que pudiera surgir en el caso de una liquidación parcial de obra o de revisión de precios.

✓ Plazo de ejecución de obra contratada.

Las propuestas de los distintos gremios se presentarán en sobre cerrado por duplicado a la Dirección de Obra.

Para realizar la revisión de precios se usarán los últimos índices oficiales de revisión de precios que hayan sido aprobados por la Comisión Delegada de Asuntos Económicos y que hayan sido publicados en el BOE.

Las fórmulas polinómicas con estructuras de costos en la actualidad autorizadas y por consiguiente utilizadas en las revisiones de contratos, son las derivadas del Decreto Ley 2/1964 de 4 de Febrero, por el que se modifica el 16/1963, de 10 de Octubre, sobre inclusión de cláusulas de revisión en los contratos de grados y Organismos Autónomos (BOE 6/2/64).

Las fórmulas actualmente aplicables: de la 1 a la 39 del Decreto 3650/1970 de 19 de Diciembre (B.O.E 29/12/ 70) y de la 40 a la 48 del Real Decreto 2167/1981 de 20 de agosto (B.O.E de 24/9/81).

Estas 48 fórmulas tipos, sirven para la revisión de 76 clases de obras, usando las que sean necesarias para cada trabajo.

2.2.6. Valoración, medición y abonos de los trabajos.

Las valoraciones de las unidades de obra que figuren en el presente Proyecto se efectuarán multiplicando el número de aquellas por el precio unitario asignado a las mismas en el Presupuesto.

En el precio unitario a que alude el párrafo anterior se considera incluidos los gastos de transporte de materiales, las indemnizaciones o pagos que hayan de hacerse por cualquier concepto, así como todo tipo de impuestos fiscales que graven los materiales, ya sea de origen estatal, autonómico o municipal, y también las cargas sociales.

Igualmente, serán de cuenta del Contratista los honorarios, las tasas y demás gravámenes que se originen por inspecciones, aprobación y comprobación de las instalaciones con que esté dotado el local.

En el precio de cada unidad de obra están comprendidos los costes de todos los materiales, accesorios y operaciones necesarias para dejar la obra terminada y en disposición de ser recibida.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.2.7. Penalizaciones.

Si finalizado el plazo de ejecución de las obras, éstas no hubieren terminado sin motivo justificado por parte de la contrata, se aplicarán los siguientes recargos a imputar al Contratista desde fecha de finalización de las obras:

- ✓ Por día natural de retraso un 0,1% de la fianza, hasta el día 30.
- ✓ A partir del día 31 hasta el día 60 la penalización por día natural de retraso será de un 0,5% del valor al que ascienda la fianza.

Pasados estos plazos se rescindirá el contrato quedando obligado el Contratista a responder por daños y perjuicios a esta entidad. De igual manera se actuará en caso de que se dé incumplimiento del contrato por parte del Contratista.

2.2.8. Seguros y conservación de la Obra.

El Contratista y otros contratistas o subcontratados, empleados en el área de trabajo, procederán en todo momento en función de los mejores intereses de la Propiedad y protegerán en toda su capacidad la propiedad, equipo y herramientas de este último.

El Contratista será considerado como el contratista principal, y será responsable del trabajo y acciones de todas las otras firmas contratadas o subcontratadas empleadas por el mismo.

El Contratista notificará inmediatamente a la Propiedad de cualquier práctica peligrosa por otros contratistas no empleados por ella misma. En ausencia del representante autorizado de la Propiedad, el Contratista actuará por criterio propio para prevenir o evitar por parte de terceras personas cualquier acción que pudiera resultar en perjuicio de la Propiedad o poner en peligro el personal o la obra.

Durante la ejecución del trabajo, el Contratista será enteramente responsable de los daños que se pudieran ocasionar en personas o cosas, a terceros y/o a la Propiedad. El Contratista mantendrá en vigor, y a su costa, durante el período de construcción y de pruebas, los siguientes seguros:

- ✓ De accidentes de trabajo y demás seguros sociales de su personal, según la legislación vigente.
- ✓ De daños que puedan sufrir las obras provisionales realizadas durante el periodo de construcción y de pruebas, incluyéndose la cobertura de riesgos catastróficos.
- ✓ Seguro obligatorio de vehículos a motor, propio o contratados que intervengan en los trabajos de construcción a todo riesgo, con garantía de responsabilidad civil limitada.

El Contratista se compromete a mostrar a la Propiedad los seguros que cubren los límites antes citados.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

El Contratista exigirá, en nombre de la Propiedad, que formalicen y mantengan en vigor a su costa durante el periodo de construcción y de prueba los mismos seguros antes mencionados.

El Contratista mantendrá libre a la Propiedad de todas las reclamaciones por siniestros indemnizables, sobre la base de riesgos cubiertos por los seguros indicados, aunque estos no hubieran sido mantenidos en vigor por el Contratista y/o subcontratados durante el periodo de construcción y de pruebas. El Contratista acreditará el cumplimiento de lo establecido en este punto ante la Propiedad y la Dirección de Obra con antelación al comienzo de las obras.

2.2.9. Condiciones de pago.

Los pagos se harán mensualmente por el 100 % del importe de la certificación aprobada respecto a unidades de obra completadas correspondiente al mes anterior.

Las cantidades retenidas serán reintegradas por la Propiedad al Contratista una vez cumplido el plazo de garantía, siempre que no se haya observado ningún defecto en la ejecución de los trabajos realizados, mala calidad de los materiales utilizados y se haya firmado el acta de recepción definitiva.

Las certificaciones se presentarán mensualmente a la representación de la Propiedad por triplicado y en forma aceptable por la misma. En cada certificación constará por separado el importe de los trabajos realizados. Las certificaciones reflejan el total acumulado del trabajo realizado hasta finales del mes anterior y se presentarán a la representación de la Propiedad en los primeros diez días de cada mes para la comprobación de las mismas.

Al finalizar el trabajo el Contratista presentará una última certificación con carácter definitivo en la que haga constar que renuncia a toda reclamación por omisión de cantidades de trabajo no certificadas con anterioridad y que todos los precios aplicados a las unidades de trabajo realizadas son conformes.

2.3. Condiciones Generales Legales.

2.3.1. Disposiciones Legales.

Se disponen de las siguientes:

- ✓ Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo y Plan Nacional de Higiene y Seguridad del Trabajo (O.M. 9-III-71).
- ✓ Comité de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Decreto 432/71 11-III-71).
- ✓ Reglamento de Seguridad e Higiene en la Industrias de la Construcción (O.M. 20-V-52).
- ✓ Reglamento de los Servicios Médicos de Empresa (O.M. 21-IX- 59).
- ✓ Ordenanza de Trabajo de Construcción, Vidrio y Cerámica (O.M. 28-VIII-70).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- ✓ Reglamento Electrotécnico de Líneas Baja Tensión (O.M. 20- IX-73).
- ✓ Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión (O.M. 28-XI-68).
- ✓ Convenio Colectivo Provincial del Sector de la Construcción y Estatuto de los Trabajadores.
- ✓ Obligatoriedad de la Inclusión de un Estudio de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Proyectos de Edificación (R.D. 555/1986, 21-II-86).
- ✓ Las normas que estén en vigor en el momento.

También es de cumplimiento obligado cuanto la Dirección de Obra dicte encaminado a garantizar la seguridad de los obreros y de la obra en general.

2.3.2. Contratista.

El Contratista deberá acreditar su capacidad técnica para la realización de la obra ante la Propiedad mediante la información que se detalla a continuación:

1. Lista de obras realizadas:

- Lista de obras construidas durante los últimos cinco años, en las que la empresa haya sido Contratista único o miembro de un consorcio con intervención significativa en el mismo, indicando ubicación, costo y tipo de contrato, plazo contractual, tiempo de ejecución real, etc.
- Información documentada sobre la ejecución en los últimos cinco años, de obras similares en características y magnitud, si las hubiera, en las cuales haya sido Contratista único o miembro de un consorcio donde haya ejercido participación principal. En cada caso se mencionará el plazo contractual y si se ha cumplido con el mismo, debidamente certificado.

2. Lista de equipamiento y maquinarias: a afectar a estas obras, con indicación de sus características, estado de conservación, tiempo de uso y de vida útil.

3. Personal a emplear: nómina, currículo y calificación del personal directivo y de conducción de la empresa.

Esta documentación debe ser de conformidad de la Propiedad y constituirá una razón para la denegación de la obra.

2.3.3. Contrato.

El contrato se firmará dentro de los diez días de notificada la adjudicación.

A partir de la firma del contrato, la Propiedad podrá extender la Orden de Inicio de Obra correspondiente.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Firmado el contrato, el Contratista no podrá transferirlo ni cederlo, en todo o en parte, a otra persona o entidad, ni asociarse para su cumplimiento sin autorización previa y por escrito de la Propiedad.

En el caso de que el Contratista no disponga del equipamiento propio necesario para realizar los servicios objeto del contrato, deberá presentar indefectiblemente, previo a la firma del contrato, documentaciones que acrediten el contrato de alquiler del mismo.

2.3.4. Adjudicación.

La forma de adjudicación será mediante subasta cerrada. Las ofertas serán evaluadas sobre la base de las condiciones legales, técnicas, económicas y financieras establecidas en las mismas.

A los efectos de formular el ordenamiento prioritario de las ofertas con vistas a la adjudicación, se considerarán los siguientes aspectos:

- ✓ Documentación técnica.
- ✓ Condiciones económica-financieras.
- ✓ Precio final.
- ✓ Tiempo de ejecución de la obra.

La Propiedad adjudicará el contrato a la oferta más adecuada a sus necesidades siempre que cumplan con las condiciones del Pliego de Condiciones.

Se establece un rango razonable de precio de oferta, que estará comprendido entre el 10 y el 25 % del precio estimado para la ejecución de la obra. Las ofertas que se encuentren por debajo del límite inferior de este rango serán consideradas de riesgo de ejecución.

La Propiedad se reserva el derecho de rechazar algunas o todas las ofertas, incluida la de menor precio ofertado si las mismas, a su exclusivo juicio, no se ajustan a las condiciones del presente Pliego. Para poder adjudicar la licitación se deberá contar con tres ofertas válidas entre las que se determine la que sea más baja.

En caso de que entre las ofertas adjudicables apareciesen algunas iguales en precio y condiciones, se procederá a una nueva licitación limitada al precio, por propuesta cerrada, entre dichos ofertantes exclusivamente, señalándose al efecto día y hora dentro de un plazo que no exceda de una semana. La adjudicación será notificada al ofertante adjudicatario dejando establecidas las condiciones bajo las que haya sido adoptada, y de igual manera será también notificada a todos los ofertantes no adjudicatarios.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.3.5. Arbitrajes y Jurisdicción competente.

Como se ha indicado anteriormente la Propiedad designará una Dirección Técnica, a la que el Contratista comunicará por escrito el nombre del delegado del Contratista o jefe de obra (nombramiento que deberá ser aprobado por la Dirección Técnica).

Cualquier cuestión que surja entre las partes sobre la interpretación o cumplimiento del presente contrato, y no sea posible llegar a un acuerdo entre la Propiedad y el Contratista, será sometida a un arbitraje de equidad con arreglo a las normas que regulen este tipo de procedimiento.

En los contratos con firmas nacionales, se acatará el arbitraje de la Cámara de Comercio e Industria Española, basándose en la Ley 60/2003 de 23 de Diciembre (BOE 309 de 26 de Diciembre de 2003, sección 1, pág. 46097 a 46109). Con las firmas extranjeras se usarán las normas de arbitraje de la Cámara de Comercio de París.

2.3.6. Responsabilidades del Contratista

En la ejecución de las obras que se hayan contratado, el Contratista será el único responsable, no teniendo derecho a indemnización alguna por el mayor precio a que pudieran resultarle, ni por las erradas maniobras que cometiese durante la construcción, siendo de su cuenta y riesgo e independiente de la inspección de la Dirección de Obra.

El Contratista también será el responsable del pago de los salarios y de los materiales necesarios para el desarrollo de la obra, así como de la buena calidad de los trabajos realizados.

Asimismo será el único responsable ante los Tribunales de la situación tanto legal como laboral del personal, así como de los accidentes que se produjeran durante la realización de la obra y que sobrevinieran por inexperiencia o descuido.

Si el Contratista causase algún desperfecto en las propiedades colindantes tendrá que restaurarlas por su cuenta, dejándolas en el estado en que las encontró al comienzo de la obra.

Por lo tanto será de cuenta del Contratista la recuperación de cualquier daño, o indemnización por él, que puedan ocasionar sus instalaciones, construcciones auxiliares y demás operaciones realizadas por el Contratista para la realización de la obra en propiedades particulares.

Las multas y fianza, que también serán por cuenta del Contratista, se estipularán tras la firma del Programa de Trabajo, y se aplicarán con rigurosidad según la cantidad que se estipule.

El Contratista proporcionará a la Dirección técnica o a sus auxiliares toda clase de facilidades para el replanteo, reconocimiento, mediciones, pruebas de materiales e inspecciones visuales de la ejecución de todas las unidades de obra, con objeto de comprobar el cumplimiento de las condiciones exigibles en el presente Pliego.

El Contratista será el único responsable por el pago de todos los impuestos, derechos, tasas, contribuciones y cargas sociales previstos por las Leyes del País donde se ejecute la obra,

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

por lo que tiene la obligación de ser conocedor de las mismas. Se considera que todos los precios consignados en la oferta cubren los pagos de los mismos sin excepción alguna. La Propiedad podrá exigir que el Contratista presente los comprobantes de pagos de impuestos, derechos, tasas, contribuciones y cargas sociales, constituyendo el incumplimiento de esta cláusula causa de rescisión del contrato.

2.3.7. Subcontratas

El Contratista no subcontratará ni se asociará a terceros para la ejecución del trabajo sin aprobación previa por escrito de la Propiedad. Esta aprobación no eximirá al Contratista de sus responsabilidades ni de sus obligaciones derivadas del contrato.

La Dirección Técnica de Obra podrá rechazar a aquellos subcontratistas de los que existen antecedentes de mala ejecución, incumplimiento de las especificaciones de proyecto, retraso en la ejecución de los trabajos o por cualquier otra causa debidamente justificada.

Los subcontratados, asociados, agentes, etc., contratados por el Contratista para el trabajo serán considerados a todos los efectos como empleados del Contratista.

El Contratista deberá asegurarse de que todos sus subcontratados, asociados, agentes, etc., empleados en el trabajo, cumplen con los términos del contrato como si fueran sus empleados, siendo único responsable de cualquier fallo o negligencia causada por aquellos.

2.3.8. Accidentes de trabajo

El Contratista cumplirá estrictamente y hará cumplir a su personal las disposiciones de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo (BOE 188 de 7 de Agosto de 1997, sec. 1, págs. 24063 a 24070), así como las normas de seguridad de la Propiedad, ya sean generales o particulares.

El Contratista designará un miembro de su organización en la obra cuya obligación será la de velar por la prevención de accidentes y el cumplimiento de las normas que regulen la materia. El nombre y cargo de la persona que se designe será comunicado por el Contratista a la Propiedad antes de comenzar el trabajo.

Por lo tanto el Contratista deberá equipar a su personal de los elementos de protección adecuados al trabajo que realicen, obligatorios según la Reglamentación en vigor de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Estos medios de protección personal para los trabajadores serán homologados por el Servicio Social de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Todas las herramientas y equipos del Contratista serán adecuadas para el trabajo y no afectarán a la seguridad ni a los elementos de protección personal. Si las herramientas fueran inadecuadas o peligrosas, a juicio de la representación de la Propiedad, deberán ser sustituidas por otras a cargo del Contratista.

El Contratista adoptará cuantas medidas sean necesarias para evitar la caída de operarios, desprendimiento de herramientas y materiales que puedan poner en peligro la integridad física de alguna persona, siendo el responsable de los daños ocasionados si llegan a

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

concurrir. En caso de incumplimiento de las normas de seguridad o de las dictadas por las autoridades competentes, ya sean generales o particulares de la Propiedad, la Propiedad se reserva el derecho a ejercer cualquiera de las siguientes acciones:

- ✓ Expulsión del complejo, de la persona, o personas, que las hayan incumplido.
- ✓ Suspensión de la ejecución de los trabajos mientras no se asegure el total cumplimiento. Esta suspensión no será justificativa para ampliar el plazo de ejecución establecido.
- ✓ Imposición de multas al Contratista, hasta un importe equivalente al beneficio del contrato correspondiente a las obras que estuviera ejecutando, para lo cual este porcentaje deberá constar explícitamente en su oferta.
- ✓ Rescisión del contrato, ejecutando las acciones correspondientes por indemnización de daños y perjuicios.

En caso de accidentes o peligro inminente, en el que exista riesgo para las vidas de las personas, para la obra en curso, para otras obras ya ejecutadas o para las propiedades colindantes, se autorizará al Contratista para actuar a discreción en cuanto sea necesario para prevenir las pérdidas o daños que pudieran producirse, debiendo ejecutar tales órdenes inmediatamente. Las compensaciones que el Contratista reclame como consecuencia de estos trabajos de emergencia se fijarán de común acuerdo o mediante arbitraje.

El Contratista será el único y exclusivo responsable, durante la ejecución de los trabajos, de todos los accidentes que puedan sufrir sus operarios o causados por él a otras personas, entidades o cosas, asumiendo todas las responsabilidades ajenas a la legislación vigente sobre accidentes de trabajo, daños a las cosas, propiedades de terceros, etc. Si se presupone un diagnóstico superior al leve en accidente de trabajo, el Contratista, o su representante, deberá personarse en las oficinas de personal de la Propiedad para comunicar tal circunstancia y facilitar los datos personales del accidentado, tipo de accidente ocurrido, lugar, causa y cuantos datos aclaratorios sean necesarios.

El Contratista informará a la Propiedad con la máxima urgencia de cualquier dificultad de tipo laboral que surja entre él y sus trabajadores, a fin de que, por parte de la Propiedad puedan adoptarse las medidas oportunas con relación al caso que se trate.

2.3.9. Rescisión de Contrato

Cuando, a juicio de la Propiedad, el incumplimiento por parte del Contratista de alguna de las cláusulas contractuales establecidas en cualquier medida, extensión o modalidad, siempre que a juicio de la Dirección Técnica sea por descuido inexcusable o mala fe manifiesta, pudiera ocasionar graves trastornos en la realización de las obras, en el cumplimiento de los plazos, o en su aspecto económico, la Propiedad podrá decidir la resolución de las obras, con las generalidades a que hubiera lugar. Así mismo podrá proceder a la resolución con la pérdida de la fianza, de producirse alguno de los siguientes casos:

1. Muerte o incapacidad del Contratista.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2. Quiebra o incapacidad económica del Contratista. En caso de quiebra del Contratista se hará un concurso entre los acreedores del mismo. El contrato quedará rescindido, a no ser que los sindicatos correspondientes ofrezcan llevar a cabo la obra bajo las condiciones estipuladas en este convenio y en los documentos adicionales. La empresa contratante podrá admitir o rechazar el ofrecimiento sin que en este último caso tenga derecho a indemnización alguna. Igualmente quedará rescindido el contrato cuando el contratista no cumpla las obligaciones contraídas en el contrato.

3. La disolución por cualquier causa de la sociedad. Alteraciones del contrato por alguna de las siguientes causas:

- ✓ Modificación del proyecto de tal forma que represente alteraciones fundamentales del mismo a juicio de la Dirección Técnica, y en cualquier caso siempre que la variación del presupuesto de contrata, como consecuencia de estas modificaciones, represente alrededor del 25% como mínimo del importe actual.

- ✓ Modificación de las unidades de obra en número superior al 50% del total.

- ✓ Cuando se cumpla el plazo final de las obras y falte por ejecutar más del 20% del presupuesto de obra. La imposición de las multas establecidas por los retrasos no obligará a la Propiedad a la prórroga del mismo, siendo potestativo por su parte elegir ante la resolución o la continuidad del contrato.

4. Cuando no se hubiera realizado el montaje de las instalaciones y unidades auxiliares o no se hubiera aportado la maquinaria relacionada en la oferta o su equivalente en potencia o capacidad en los plazos previstos con un margen del 25%; o en el caso de que el Contratista sustituya maquinaria sin autorización.

5. Cuando transcurrido un tiempo de tres meses consecutivos y considerados conjuntamente, no se alcanzase un 50% del programa aprobado para la obra.

6. La suspensión de la obra una vez comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido de un mes, y en todo caso siempre que por causas ajenas a la contrata no se dé comienzo a la obra dentro del plazo de 60 días, contados a partir de la adjudicación, en cuyo caso la devolución de la fianza será automática.

7. En caso de rescisión del contrato con el Contratista por causas de fuerza mayor se abonará al mismo tiempo el importe de la obra ejecutada y valoración de los materiales que haya hecho acopio de la misma.

8. La inobservancia del plan cronológico de la obra y en especial del plazo de ejecución y terminación total de la misma.

En caso de cancelación, la Propiedad tendrá derecho a estar inmediatamente en posesión de los pedidos en curso y de la parte o partes de la obra que la Propiedad seleccione, junto con los materiales y herramientas, bien sean de la parte contratante o del Contratista, y completar el trabajo. El Contratista será razonablemente pagado por el alquiler que haya sido convenido con la Propiedad por el uso de las herramientas del Contratista, o si este lo prefiere, puede retirar dichas herramientas siempre y cuando:

- ✓ El retiro de tales herramientas no afecte a la terminación de las obras.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

- ✓ La propiedad esté de acuerdo con dicho retiro.
- ✓ El coste del retiro vaya a cuentas del Contratista.

Las herramientas del Contratista, empleadas por la empresa contratante para la terminación de la obra, serán desmanteladas, cargadas y si es el caso, preparadas para el embarque por la Propiedad. Todos los costes derivados después de que las herramientas sean cargadas al transporte o abandonen los dominios de la Propiedad, serán por cuenta del Contratista, independientemente de que sean manejadas, movidas o embarcadas por el Contratista o por la Propiedad.

Todos los materiales o equipos que estén bajo pedido en el momento de la cancelación serán manejados hasta su entrega y facturación indistintamente por la Propiedad o por la empresa contratada, según se decida en el tiempo de cancelación del contrato.

El Contratista será reembolsado por todas las facturas que deba o hayan sido pagadas después de la cancelación, de acuerdo con las condiciones aplicables a lo gastado más el porcentaje. Cuando la Propiedad así lo solicite, el Contratista le transferirá todos los pedidos abiertos o pedidos cuyos materiales no hayan sido entregados. En tal caso, el vendedor será informado de la transferencia por el Contratista y cambiará de manera correspondiente su procedimiento de facturación.

En el caso de que dichas facturas sean remitidas al Contratista, para su pago, entre las dos partes habrá de llegarse a un acuerdo mutuo con respecto al método más satisfactorio de manejo.

Siempre que el Contratista sea requerido para procesar y facturar dichas facturas deberá ser reembolsado por tales costes más el porcentaje especificado.

En el caso de que la cancelación de este convenio se deba a la decisión de la Propiedad para no continuar la obra, o por otras causas fuera de control con respecto a la conclusión de la obra, todos los convenios que aquí figuran serán aplicados con las siguientes especificaciones:

- ✓ El Contratista procederá inmediatamente a cancelar todas las órdenes de compra de materiales o equipos entregados, avisando a cada vendedor de la intención de cancelar dichas órdenes. El vendedor avisará de los cargos de cancelación y, de existir éstos, él deberá notificar detalladamente tales cargos al Contratista.

Éste avisará entonces inmediatamente a la Propiedad de dichos cargos y solicitará una declaración de aceptación de la Propiedad.

- ✓ La Propiedad reembolsará al vendedor todos los costes mencionados, bien sean costes de cancelación del vendedor u otros costes resultantes de la cancelación.

- ✓ En general, la Propiedad rescatará cualquier envío sobre el que la cancelación sea del 100% del precio de compra, aunque el Contratista avisará a la Propiedad de dichos pagos antes de que el vendedor sea notificado para continuar.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

CAPITULO 3. CONDICIONES PARTICULARES.

Las condiciones particulares o prescripciones técnicas particulares son aquellas en las que se hace una descripción de los materiales, equipos y obras que van a realizarse en el proyecto, así como la forma de ejecución de las mismas.

También se indicarán en ellas, las obligaciones de orden técnico que correspondan al Contratista y al Director Técnico o Ingeniero.

Así, según lo expuesto en el párrafo anterior, el objeto de estudio de las condiciones particulares será las condiciones de materiales, equipos y maquinaria y por otra parte las condiciones de ejecución de obras.

3.1. Disposiciones de Carácter Particular.

Las disposiciones de carácter particular y de ámbito técnico son:

- ✓ Normativa de la Asociación Española de Normalización (AENOR).
- ✓ Normas Tecnológicas de Edificación:
- ✓ Instalaciones de fontanería. Abastecimiento (IFA).
- ✓ Instalaciones de salubridad. Alcantarillado (ISA).
- ✓ Instalaciones eléctricas. Puesta a tierra (JET).

3.2. Condiciones de Materiales, Equipos y Maquinaria.

3.2.1. Materiales de Construcción.

Todos los materiales que se empleen en la construcción, han de cumplir las normas que se encuentran en el catálogo de normas UNE de 1992. Para aquellos materiales en los que no haya nada especificado, se seguirán las instrucciones de la Dirección Técnica, y en cualquier caso serán de la mejor calidad entre los de su clase.

Además estos materiales podrán ser sometidos a pruebas o análisis por cuenta de la contrata que se crean necesarios para acreditar su calidad; aquel material que a juicio de la Dirección Técnica no reúna las condiciones exigidas será rechazado (**Tabla I**).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Tabla I: Normas a verificar por los materiales de construcción.
Normas UNE 1.992

MATERIALES	Nº	PÁGINA
Cemento	43	383-384
Hormigón	100	389-392
Producto cerámico para la construcción	23	370-371
Producto de cemento reforzado con fibras	19	398
Prefabricados de cemento y caucho	21	416-417
Pinturas y barnices	166	293-298
Materiales cerámicos de arcilla cocida para la construcción	30	419-420
Materiales impermeabilizantes para la construcción	130	402-408
Materiales refractarios	40	365-366
Ensayos de materiales	255	113-121

3.2.2. Materiales para la fabricación de equipos.

El material a utilizar en la fabricación de los equipos es el que se especifique en el anexo correspondiente al diseño de cada uno de los equipos.

Los materiales utilizados en los equipos de la instalación son aceros al carbono SA-285, SA-283 y SA-106. Las diferentes normas a las que están sujetos los materiales para la fabricación de los equipos y ensayos de estos materiales son:

•**UNE 7183:1964** Método de ensayo para determinar la uniformidad de los recubrimientos galvanizados, aplicados a los materiales manufacturados de hierro y acero.

•**UNE-EN ISO 1461:1999** Recubrimientos galvanizados en caliente sobre productos acabados de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo. (ISO 1461:1999).

•**UNE-EN 10257-1:1998** Alambres de acero no aleado recubiertos de cinc o aleaciones de cinc para armado de cables para el transporte de energía o cables para telecomunicaciones. Parte 1: Cables terrestres.

•**UNE-EN 10257-1:1998** Alambres de acero no aleado recubiertos de cinc o aleaciones de cinc para armado de cables para el transporte de energía o cables para telecomunicaciones. Parte 1: Cables terrestres.

•**UNE 37505:1989** Recubrimientos galvanizados en caliente sobre tubos de acero. Características y métodos de ensayo.

•**UNE-EN ISO 1461:1999** Recubrimientos galvanizados en caliente sobre productos acabados de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo. (ISO 1461:1999).

•**UNE-EN 12502-3:2005** Protección de materiales metálicos contra la corrosión. Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

almacenamiento de agua. Parte 3: Factores que influyen para materiales férreos galvanizados en caliente.

•**UNE 37553:1973** Recubrimientos electrolíticos de cinc y cadmio sobre tortillería con rosca métrica de perfil triangular ISO.

•**UNE 112017:1992** Recubrimientos metálicos. Medición del espesor. Métodos por espectrometría de rayos X.

•**UNE-EN ISO 4516:2002** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayos de microdureza Vickers y Knoop. (ISO 4516:2002).

•**UNE-EN 12540:2001** Protección de metales contra la corrosión. Recubrimientos electrolíticos de níquel, níquel más cromo, cobre más níquel y cobre más níquel más cromo.

•**UNE 112022:1993** Recubrimientos metálicos. Recubrimientos electrolíticos de cromo. Ensayo de corrosión electrolítica (ensayo, etc).

•**UNE 112036:1993** Recubrimientos metálicos. Depósitos electrolíticos de cinc sobre hierro o acero.

•**UNE-EN 12330:2001** Protección contra la corrosión de metales. Recubrimientos electrolíticos de cadmio sobre hierro o acero.

•**UNE-EN ISO 6158:2005** Recubrimientos metálicos. Recubrimientos electrolíticos de cromo para fines industriales. (ISO 6158:2004)

•**UNE 112039:1994** Recubrimientos de aleación de estaño-níquel. Especificaciones y métodos de ensayo.

•**UNE 112040:1994** Recubrimiento electrolítico de aleación estaño-plomo. Especificaciones y métodos de ensayo.

•**UNE 112041:1994** Recubrimiento metálico. Depósitos electrolíticos de estaño. Especificaciones y métodos de ensayo.

•**UNE-EN 12476:2001** Recubrimientos de conversión fosfatantes de metales. Método de especificación de requisitos.

•**UNE-EN 582:1994** Proyección térmica. Medida de la adherencia por ensayo de tracción. (Versión oficial en UNE 112051:1994).

•**UNE-EN ISO 2063:2005** Proyección térmica. Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos inorgánicos. Cinc, aluminio y sus aleaciones (ISO 2063:2005).

•**UNE-EN ISO 10289:2001** Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos y no orgánicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión. (ISO 10289:1999).

•**UNE-EN ISO 2064:2001** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Definiciones y principios concernientes a la medida del espesor. (ISO 2064:1996).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

•**UNE-EN ISO 2177:2005** Recubrimientos metálicos. Medida del espesor. Método coulombimétrico por disolución anódica. (ISO 2177:2003).

•**UNE-EN ISO 2178:1996** Recubrimientos metálicos no magnéticos sobre metal base magnético. Medida del espesor. Método magnético (ISO 2361:1982).

•**UNE-EN ISO 21787:2007** Válvulas industriales. Válvulas de globo de materiales termoplásticos (ISO 21787:2006).

•**UNE-EN ISO 2819:1996** Recubrimientos metálicos sobre base metálica. Depósitos electrolíticos y depósitos por vía química. Lista de los diferentes métodos de ensayo de adherencia (ISO 2819:1980).

•**UNE-EN ISO 3892:2002** Recubrimientos de conversión sobre materiales metálicos. Determinación de la masa de recubrimiento por unidad de superficie. Métodos gravimétricos. (ISO 3892:2000).

•**UNE-EN ISO 4518:1986** Recubrimiento metálicos. Medición del espesor. Métodoperfilométrico (ISO 4518:1980).

•**UNE-EN ISO 10289:2001** Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos y no orgánicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión. (ISO 10289:1999).

•**UNE-EN ISO 4543:1996** Recubrimiento metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Directrices generales para los ensayos de corrosión aplicables a condiciones de almacenamiento (ISO 4543:1981).

•**UNE-EN ISO 6988:1996** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de humedad. (ISO 6988:1985).

•**UNE-EN ISO 7384:1996** Ensayos de corrosión en atmósfera artificial. Prescripciones generales. (ISO 7384:1986).

•**UNE-EN ISO 7441:1996** Corrosión de los metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bimetalica mediante ensayos de corrosión en medio exterior. (ISO 7441:1984).

•**UNE-EN ISO 7539-1:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayo de corrosión bajo tensión. Parte 1: guía general de métodos de ensayo (ISO 7539-1:1987).

•**UNE-EN ISO 7539-2:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 2: preparación y utilización de probetas para ensayos de flexión. (ISO 7539-2:1987).

•**UNE-EN ISO 7539-3:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 3: preparación y utilización de probetas dobladas en U. (ISO 7539-3:1989).

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

•**UNE-EN ISO 7539-4:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 4: preparación y utilización de probetas para ensayos de tracción uniaxial. (ISO 7539-4:1989).

•**UNE-EN ISO 7539-5:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 5: preparación y uso de probetas con forma de anillo en C (ISO 7539-6:1989).

•**UNE-EN ISO 7539-6:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 6: preparación y uso de probetas prefiguradas para ensayos bajo carga constante o desplazamiento constante (ISO 7539- 6:1989).

•**UNE-EN ISO 7539-7:2006** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 7: Ensayo a baja velocidad de deformación. (ISO 7539-7:2005).

•**UNE-EN ISO 8401:1996** Recubrimientos metálicos. Revisión de los métodos de determinación de la ductilidad. (ISO 8401:1986).

•**UNE-EN 10289:2001** Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos y no orgánicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión. (ISO 10289:1999).

•**UNE-EN ISO 8565:1996** Metales y aleaciones. Ensayos de corrosión atmosférica. Requisitos generales para realizar ensayos in situ. (ISO 8565:1992).

•**UNE-EN ISO 9220:1996** Recubrimientos metálicos. Medida del espesor del recubrimiento. Método de microscopía electrónica de barrido. (ISO 9220:1988).

•**UNE-EN ISO 10062:1996** Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales con muy bajas concentraciones de gases contaminantes. (ISO 10062:1991).

•**UNE 92102:1998** Materiales aislamiento térmico. Lana de vidrio. Definiciones, clasificación y características.

•**UNE 92201:1989** Materiales aislantes térmicos. Determinación de la conductividad térmica. Técnica de la placa calefactora con anillo de guarda y doble placa refrigerante.

•**UNE 92208:1999** Materiales aislantes térmicos. Productos de lana de vidrio/o roca. Determinación de la cantidad de vidrio y aglomerante orgánico.

•**UNE 92209:1989** Materiales aislantes térmicos. Productos de fibra de vidrio/ o roca. Determinación de las dimensiones.

•**UNE-EN 13469:2002** Productos aislantes térmicos para equipos de edificación e instalaciones industriales. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua en coquillas aislantes preformadas.

•**UNE 92227:1989** Materiales aislantes térmicos. Determinación de la absorción de agua por el método de vacío.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

•**UNE-EN 13467:2002** Productos aislantes térmicos para equipos de edificación e instalaciones industriales. Determinación de las dimensiones, rectangularidad y linealidad de coquillas aislantes preformadas.

•**UNE-EN ISO 7345:1987** Aislamiento térmico. Magnitudes físicas y definiciones. (ISO 8497:1987).

•**UNE-EN ISO 8497:1997** Aislamiento térmico. Determinación de las propiedades relativas a la transmisión de calor en régimen estacionario en los aislamientos térmicos para tuberías (ISO 8497:1994).

•**UNE-EN ISO 9251:1996** Aislamiento térmico Condiciones de transmisión térmica y propiedades de los materiales. Vocabulario (ISO 9251:1987).

•**UNE-EN ISO 9346:1996** Aislamiento térmico. Transferencia de masa. Magnitudes físicas y definiciones (ISO 9346:1987).

•**UNE-EN 12329:2001** Protección contra la corrosión de los metales. Recubrimientos electrolíticos de cinc sobre hierro o acero.

•**UNE-EN 12330:2001** Protección contra la corrosión de metales. Recubrimientos electrolíticos de cadmio sobre hierro o acero.

•**UNE-EN ISO 1463:2005** Recubrimientos metálicos y capas de óxido. Medida del espesor. Método de corte micrográfico (ISO 1463:2003)

•**UNE-EN ISO 2361:1996** Recubrimientos electrolíticos de níquel sobre base metálica magnética y no magnética. Medición del espesor. Método magnético. (ISO 2361:1982).

•**UNE-EN ISO 3868:1996** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Medida del espesor. Método basado en el principio de *Fizeau* de interferometría de haz múltiple. (ISO 3868:1976).

•**UNE-EN ISO 12241:1999** Aislamiento térmico para equipos de edificación e instalaciones industriales. Método de cálculo. (ISO 12241:1998).

•**UNE-EN ISO 8990:1997** Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (ISO 8990:1994).

3.2.3. Equipos.

Las normas a las que se encuentran sujetos todos los equipos se encuentran también en el Catálogo de Normas UNE de 1992, en la siguiente tabla se muestran el número de normas clasificadas por su naturaleza y la localización de las mismas en dicho catálogo:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

**Tabla II: Normas que han de cumplir los equipos.
Normas UNE 1.992.**

NORMAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS EQUIPOS		
CONCEPTO	Nº NORMAS	PÁGINAS
Bienes de equipo para la Industria Química	10	355-361
Seguridad en el almacenamiento y manipulación de productos químicos	3	411-412
Tuberías y accesorios	60	126-128

3.2.4. Maquinaria.

Las normas que debe cumplir la maquinaria es la que se refleja en la **Tabla III.**

Tabla III: Normas a cumplir por la maquinaria. Normas UNE 1.992.

NORMAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS EQUIPOS		
CONCEPTO	Nº NORMAS	PÁGINAS
Maquinaria de elevación y transporte	165	355 – 361
Maquinaria para movimientos de tierra	36	411 – 412
Herramientas	67	126 – 128

3.3. Condiciones de Ejecución.

Las condiciones de ejecución, condiciones funcionales de los materiales y equipos industriales, control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento serán establecidos en las normas NBE y NTE, así como las correspondientes si procede a equipos, materiales o maquinaria. Se considerarán:

3.3.1. Movimientos de Tierra.

Aquí se incluyen los terraplenes para dar al terreno la rasante de explanación y excavaciones de zanjas y pozos.

La excavación se ajustará a las dimensiones que figuren en los planos o a lo que indique el ingeniero.

3.3.2. Obras de Saneamiento.

Se incluyen los sistemas de captación y conducción de aguas del subsuelo para protección de la obra contra la humedad y las redes de evacuación de aguas pluviales y

Diseño de una unidad de hidrosulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

residuos, desde los puntos donde se cogen hasta la red de alcantarillados, pozos de filtración o equipos de depuración.

3.3.3. Cimentaciones.

Se incluyen las operaciones de eliminación de troncos, raíces de árboles y otros obstáculos que se encuentren en dicha zona, según normas NBE y NTE. Las zanjas de cimentación se excavarán hasta una profundidad especificada en los planos; en cualquier caso debe estar aprobada por el Ingeniero antes de colocar el hormigón o ladrillo.

3.3.4. Estructuras metálicas.

Se incluyen las operaciones relacionadas con el diseño, fabricación y montaje de acero para estructuras, según normas NBE, NTE y las especificadas para materiales.

3.3.5. Albañilería.

Se incluyen aquí las instalaciones en los puntos señalados por los planos, de los bloques de hormigón, ladrillo, piedra y revestimientos de suelos, escaleras y techos.

3.3.6. Cerrajería y Carpintería.

Se incluyen todos los trabajos relacionados con la instalación de puertas, ventanas y demás elementos de carpintería general y de taller de construcción de edificios. En la cerrajería, se incluyen las operaciones relacionadas con ajustes para obtener un acabado perfecto.

3.3.7. Cubierta de edificios.

Se incluye todo lo relacionado con la impermeabilización y el aislamiento de cubiertas de edificios. Debido a posibles inclinaciones, los aislamientos serán grapados, para evitar deslizamiento o movimientos inesperados.

3.3.8. Fontanería.

Se indican las operaciones de abastecimiento y distribución de agua.

3.3.9. Instalaciones eléctricas.

Se incluyen las operaciones relacionadas con la distribución del alumbrado.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.3.10. Calefacción y Ventilación.

Incluyen las instalaciones de ventilación, calefacción y refrigeración.

3.3.11. Instalaciones de Protección contra Incendios.

Se indican las instalaciones de protección contra fuegos y pararrayos.

3.3.12. Pinturas y vidrieras.

Se indican las operaciones de acabado de pinturas y de las superficies exteriores del edificio, incluyendo la pintura protectora de las superficies metálicas.

En las vidrieras se incluyen las operaciones relacionadas con su instalación. Las dimensiones se especifican en los planos.

3.3.13. Otras instalaciones no específicas.

Si en el transcurso fuese necesario ejecutar alguna clase de obra no regulada en el pliego, el Contratista quedará obligado a ejecutarla con arreglo a las instrucciones que reciba del ingeniero, quien a su vez cumplirá la normativa vigente. El Contratista no tendrá derecho a reclamación ninguna.

José Carlos Romero Torrecilla
Puerto Real, Marzo de 2015

Documento IV: PRESUPUESTO.

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.-Objetivos	3
2.-Estado de mediciones	3
2.1.-Equipos del proceso	4
2.2.-Equipos auxiliares	4
2.3.-Bombas y compresores	4
2.4.-Tuberías.....	5
2.5.-Válvulas y accesorios.....	6
3.-Presupuestos.....	8
3.1.-Presupuestos Parciales	8
3.1.1.-Equipos del proceso	8
3.1.2.-Equipos auxiliares	9
3.1.3.-Bombas y compresores.....	9
3.1.4.-Tuberías.....	9
3.1.5.-Válvulas y accesorios.....	10
3.2.-Presupuestos de ejecución material.....	12
3.3.-Presupuestos de ejecución por contrata	13

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

1.-Objetivos

Este documento tiene como objetivo la estimación del presupuesto general de ejecución del proyecto “Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería”. Para ello se tendrá en cuenta el coste que supondrá el inmovilizado (equipos, conducciones y accesorios) y la mano de obra para la construcción y montaje de los equipos en la instalación proyectada.

Primeramente se definirán y determinarán el número de unidades de cada partida, sus características y dimensiones con el fin de facilitar el cálculo del presupuesto.

A continuación se calculará el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) referente al precio de los equipos. A continuación, se incluirá el Beneficio Industrial y los Gastos Generales obteniéndose el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). Por último, para obtener el presupuesto total, se le añadirá el IVA, que supone un % del PEC.

Los precios indicados se corresponden con estimaciones llevadas a cabo con el simulador ASPES HYSYS, así como el uso de la bibliografía “Diseño de procesos en Ingeniería Química. Arturo Jiménez Gutiérrez” y de diferentes catálogos que se recogen en el apartado de Anexos de la Memoria.

2.-Estado de mediciones

Los requisitos básicos que debe cumplir un estado de mediciones son los siguientes:

- Definir y determinar las unidades de cada partida o unidad de obra.
- Incluir el número de unidades y definir las características, modelos, tipos y dimensiones de cada partida de obra o elemento del objeto del Proyecto.
- Utilizar el concepto de partida alzada cuando la unidad no sea fácilmente desglosable.
- Contener un listado completo de las partidas de obra.
- Subdividirse según las partes más significativas del Proyecto.
- Servir de base para la realización del presupuesto.

En base a estos requisitos, y estructurándose en los siguientes puntos, se desarrollará a continuación el estado de mediciones propuesto para el presente Proyecto:

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.1.-Equipos del proceso

Equipos	Código	Cantidad
Horno	HC	1
Reactor	RHDS	2
Torre Destilación	CD	1
Intercambiador Líquido-Líquido	ICA	1
Calderín	CV	1
Aerorefrigerante	AE	1

2.2.-Equipos auxiliares

Equipo	Código	Cantidad
Acumulador de reflujo	DRF	1

2.3.-Bombas y compresores

Unidad	Código	Descripción	Cantidad
Bomba alimentación horno	BA	$P_{req} \approx 10 \text{ atm}$ y $T \approx 20^\circ\text{C}$	2
Bomba alimentación Reactor	BAC	$P_{req} \approx 10 \text{ atm}$ y $T \approx 320^\circ\text{C}$	4
Bomba alimentación u.aminas	BAUA	$P_{req} \approx 10 \text{ atm}$ y $T \approx 320^\circ\text{C}$	2
Bomba alimentación torre	BACD	$P_{req} \approx 14 \text{ atm}$ y $T \approx 20^\circ\text{C}$	2
Bomba impulsión del reflujo	BRF	$P_{req} \approx 14 \text{ atm}$ y $T \approx 130^\circ\text{C}$	2
Compresor alimentación horno	CA	$P_{req} \approx 10 \text{ atm}$ y $T \approx 20^\circ\text{C}$	2
Compresor alimentación reactor	CHR	$P_{req} \approx 10 \text{ atm}$ y $T \approx 320^\circ\text{C}$	2

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.4.-Tuberías

Tramo	Material	Diámetro nominal[in]	Longitud[m]
1 9	SA 240(AISI-316)	12,5	4
2	SA 240(AISI-316)	8,25	3
3 4 5 6	SA 240(AISI-316)	17,5	37
7 8 17	SA 240(AISI-316)	12,75	25
10	SA 240(AISI-316)	8,25	34
11 12	SA 240(AISI-316)	5,75	19
13 14 16	SA 240(AISI-316)	6,75	32
15	SA 240(AISI-316)	10,25	12
18 19 26	SA 240(AISI-316)	6,25	26
20	SA 240(AISI-316)	1,5	11,5
21 22	SA 240(AISI-316)	3,75	2
23 24	SA 240(AISI-316)	0,65	5
25	SA 240(AISI-316)	3,75	3
27 28	SA 240(AISI-316)	5,25	11

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

2.5.-Válvulas y accesorios

Unidad	Código	Descripción	Cantidad
Válvula de compuerta	VC-01	Acero inoxidable AISI 316 DN12,5"	1
Válvula de compuerta	VC-03	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	1
Válvula de compuerta	VC-19	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	1
Válvula de compuerta	VC-23	Acero inoxidable AISI 316 DN0,75"	1
Válvula de compuerta	VC-25	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1
Válvula de compuerta	VC-28	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	1
Válvula de globo	VG-02	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1
Válvula de globo	VG-04 VG-06	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	2
Válvula de globo	VG-07 VG-08 VG-17	Acero inoxidable AISI 316 DN12,75"	3
Válvula de globo	VG-10	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1
Válvula de globo	VG-11 VG-12	Acero inoxidable AISI 316 DN5,75"	2
Válvula de globo	VG-13 VG-14 VG-16	Acero inoxidable AISI 316 DN6,75"	3
Válvula de globo	VG-18 VG-19 VG-26	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	3
Válvula de globo	VG-20	Acero inoxidable AISI 316 DN1,5"	1
Válvula de globo	VG-24	Acero inoxidable AISI 316 DN0,65"	1
Válvula de globo	VG-25	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1
Válvula de globo	VG-28	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	1

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Unidad	Código	Descripción	Cantidad
Válvula de retención	VR-02	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1
Válvula de retención	VR-24	Acero inoxidable AISI 316 DN0,65"	1
Válvula de retención	VR-25	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1
Válvula de retención	VR-28	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	1
Válvula de seguridad	VS-05	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	1
Válvula de seguridad	VS-09	Acero inoxidable AISI 316 DN12,5"	1
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	3
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN12,75"	2
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	3
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN5,75"	2
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN10,25"	1
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	3
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN1,5"	2
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1
Codo 90º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	2
Bifurcación en T	---	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	1
Bifurcación en T	---	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1
Bifurcación en T	---	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1
Bifurcación en T	---	Acero inoxidable AISI 316 DN10,25"	1

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Unidad	Código	Descripción	Cantidad
Bifurcación en Y	---	Acero inoxidable AISI 316 DN6,75"	1
Codo 45º	---	Acero inoxidable AISI 316 DN6,75"	2
Placa de orificio	---	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	2
Placa de orificio	---	Acero inoxidable AISI 316 DN1,5"	1
Placa de orificio	---	Acero inoxidable AISI 316 DN0,65"	1

3.-Presupuestos

En este apartado se calculará el Presupuesto de Ejecución Material(PEM) referente al precio de los equipos, al que se incluirá el Beneficio Industrial y los Gastos Generales obteniéndose el Presupuesto de Ejecución por Contrata(PEC).Por último, para obtener el presupuesto total, se le añadirá el IVA, que supone un 21% del Presupuesto de Ejecución por Contrata.

3.1.-Presupuestos Parciales

En este apartado se detallaran los precios de cada uno de los elementos que componen la instalación proyectada, desde los equipos auxiliares hasta las unidades de proceso más grandes.

Cabe destacar que la línea de proceso proyectada está pensada para ser instalada en refinerías que se presuponen ya construidas por lo que los costes de obra civil se consideran nulos.

3.1.1.-Equipos del proceso

Equipos	Unidades	Precio Unitario[€]	Presupuesto Parcial[€]
Horno	1	4536439,36	4536439,36
Reactor	2	1137600,07	2275200,14
Torre Destilación	1	124189,17	124189,17
Intercambiador Líquido-Líquido	1	26164	26164
Calderín	1	72567	72567
Aerorefrigerante	1	94686	94686
Presupuesto Partida Equipos de Proceso			7129245,67

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.1.2.-Equipos auxiliares

Equipos	Unidades	Precio Unitario[€]	Presupuesto Parcial[€]
Acumulador de reflujo	1	5067	5067
Presupuesto Partida Equipos de Proceso			5067

3.1.3.-Bombas y compresores

Equipos	Unidades	Precio Unitario[€]	Presupuesto Parcial[€]
Bomba alimentación horno	2	18106,09	36212,18
Bomba alimentación Reactor	4	6232	24928
Bomba alimentación u.aminas	2	16777,25	33554,5
Bomba alimentación torre	2	16777,25	33554,5
Bomba impulsión del reflujo	2	6232	12464
Compresor alimentación horno	2	12400	24800
Compresor alimentación reactor	2	7800	15600
Presupuesto Partida Equipos de Proceso			181113,18

3.1.4.-Tuberías

Material	Diámetro nominal[in]	Unidades[m]	Precio unitario[€/m]	Presupuesto parcial[€]
SA 240(AISI-316)	12,5	4	21,75	87
SA 240(AISI-316)	8,25	3	17,8	53,4
SA 240(AISI-316)	17,5	37	24	888
SA 240(AISI-316)	12,75	25	21,75	543,75
SA 240(AISI-316)	8,25	34	17,8	605,2
SA 240(AISI-316)	5,75	19	15,12	287,28
SA 240(AISI-316)	6,75	32	16,2	518,4
SA 240(AISI-316)	10,25	12	19,35	232,2
SA 240(AISI-316)	6,25	26	16,2	421,2
SA 240(AISI-316)	1,5	11,5	5,71	65,665
SA 240(AISI-316)	3,75	2	12,44	24,88
SA 240(AISI-316)	0,65	5	4,32	21,6
SA 240(AISI-316)	3,75	3	12,44	37,32
SA 240(AISI-316)	5,25	11	15,12	166,32
Presupuesto Partida Equipos de Proceso				3952,215

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.1.5.-Válvulas y accesorios

Equipos	Descripción	Unidades	Precio Unitario[€]	Presupuesto Parcial[€]
Válvula de compuerta	Acero inoxidable AISI 316 DN12,5"	1	182,7	182,7
Válvula de compuerta	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	1	197,88	197,88
Válvula de compuerta	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	1	68,6	68,6
Válvula de compuerta	Acero inoxidable AISI 316 DN0,75"	1	43,9	43,9
Válvula de compuerta	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1	179,65	179,65
Válvula de compuerta	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	1	196,43	196,43
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1	112,37	112,37
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	2	147,76	295,52
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN12,75"	3	133,31	399,93
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1	112,37	112,37
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN5,75"	2	83,84	167,68
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN6,75"	3	96,48	289,44
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	3	96,48	289,44
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN1,5"	1		0
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN0,65"	1	27,4	27,4
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1	75,39	75,39
Válvula de globo	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	1	83,84	83,84

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Equipos	Descripción	Unidades	Precio Unitario[€]	Presupuesto Parcial[€]
Válvula de retención	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1	33,16	33,16
Válvula de retención	Acero inoxidable AISI 316 DN0,65"	1	11,96	11,96
Válvula de retención	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1	15,22	15,22
Válvula de retención	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	1	22,29	22,29
Válvula de seguridad	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	1	106,25	106,25
Válvula de seguridad	Acero inoxidable AISI 316 DN12,5"	1	106,25	106,25
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	3	53,15	159,45
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN12,75"	2	49,5	99
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	3	33,9	101,7
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN5,75"	2	28,73	57,46
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN10,25"	1	42,1	42,1
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	3	31,45	94,35
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN1,5"	2	10,71	21,42
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1	22,52	22,52
Codo 90º	Acero inoxidable AISI 316 DN5,25"	2	28,73	57,46
Bifurcación en T	Acero inoxidable AISI 316 DN17,5"	1	52,11	52,11
Bifurcación en T	Acero inoxidable AISI 316 DN8,25"	1	35,26	35,26
Bifurcación en T	Acero inoxidable AISI 316 DN3,75"	1	27,07	27,07
Bifurcación en T	Acero inoxidable AISI 316 DN10,25"	1	47,82	47,82

Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

Equipos	Descripción	Unidades	Precio Unitario[€]	Presupuesto Parcial[€]
Bifurcación en Y	Acero inoxidable AISI 316 DN6,75"	1	24,35	24,35
Codo 45º	Acero inoxidable AISI 316 DN6,75"	2	14,69	29,38
Placa de orificio	Acero inoxidable AISI 316 DN6,25"	2	98,5	197
Placa de orificio	Acero inoxidable AISI 316 DN1,5"	1	21,15	21,15
Placa de orificio	Acero inoxidable AISI 316 DN0,65"	1	18,25	18,25
Presupuesto Partida Equipos de Proceso				4125,52

3.2.-Presupuestos de ejecución material

El presupuesto de ejecución material se recoge, a modo de resumen, en la siguiente tabla:

Partidas	Coste[€]
EQUIPOS DE PROCESO	7129245,67
EQUIPOS AUXILIARES	5067
BOMBAS Y COMPRESORES	181113,18
TUBERÍAS	3952,215
VÁLVULAS Y ACCESORIOS	4125,52
Presupuesto de ejecución material(PEM)	7323503,59

EL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL de la unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería asciende a la cantidad de "SIETE MILLONES TRESCIENTOS VEINTITRÉS MIL QUINIENTOS TRES EUROS CON CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS"

Puerto Real, Marzo de 2015



Fdo. José Carlos Romero Torrecilla

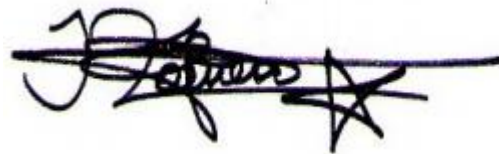
Diseño de una unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería.

3.3.-Presupuestos de ejecución por contrata

Concepto	Coste[€]
PEM	7323503,59
GASTOS GENERALES(13%)	952055,466
BENEFICIO INDUSTRIAL(6%)	439410,215
IVA(21%)	1537935,75
Presupuesto de ejecución por contrata(PEC)	10252905

EL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA de la unidad de hidrodesulfuración de una corriente de VGO para su acondicionamiento previo a un tratamiento FCC en refinería asciende a la cantidad de “DIEZ MILLONES DOSCIENTOS CINCUENTA Y DOS MIL NOVECIENTOS CINCO EUROS”

Puerto Real, Marzo de 2015



Fdo. José Carlos Romero Torrecilla

